MERLIN SHELDRAKE

# LA RED OCULTA DE LA VIDA

Cómo los hongos condicionan nuestro mundo, nuestra forma de pensar y nuestro futuro



Índice

## SINOPSIS

No son plantas ni animales y se encuentran en la tierra, en el aire y en nuestros cuerpos. Están por doquier, pero cuesta verlos. Además, pueden ser microscópicos, pero también representan a los organismos de mayor tamaño jamás registrados. Comen piedra, crean suelos, asimilan agentes contaminantes, se nutren de plantas, pero también las matan, sobreviven en el espacio e influyen en la composición de la atmósfera terrestre.

Ha llegado la hora de descubrir el oculto y fascinante mundo de los hongos, formas de vida extrañas y maravillosas que nos obligan a repensar el funcionamiento de la vida. Al proporcionar a los humanos pan, alcohol y medicamentos, han cambiado la historia de nuestra especie, mientras que su capacidad para digerir plástico, explosivos, pesticidas y petróleo crudo se aplica en el campo de las nuevas tecnologías.

Su capacidad para conectar plantas en grandes redes de colaboración subterráneas, la Wood Wide Web, está transformando nuestra comprensión de los ecosistemas. Los hongos tienen la llave para entender nuestro planeta y nuestras formas de pensar, sentir y comportarnos aunque su vida transcurra principalmente fuera de nuestra vista.

Merlin Sheldrake obliga a reconsiderar los reinos de la naturaleza en esta aventura, y nos introduce al mundo espectacular y desconocido de los hongos: organismos infinitamente sorprendentes y esenciales para la vida en nuestro planeta que han cambiado el curso de la vida y continúan dando forma a nuestro futuro. *La red oculta de la vida* es un libro brillantemente escrito y ampliamente documentado que demuestra cuán fundamentales son estos organismos para la sostenibilidad del planeta. Y este es solo el principio porque tan solo estamos empezando a entender las complejidades y sofisticaciones de la vida de los hongos.

MERLIN SHELDRAKE

# LA RED OCULTA DE LA VIDA

De qué manera los hongos
crean nuestros mundos,
cambian nuestra forma de pensar
y moldean nuestro futuro



*En agradecimiento a los hongos*
*de los que tanto he aprendido*

# PRÓLOGO

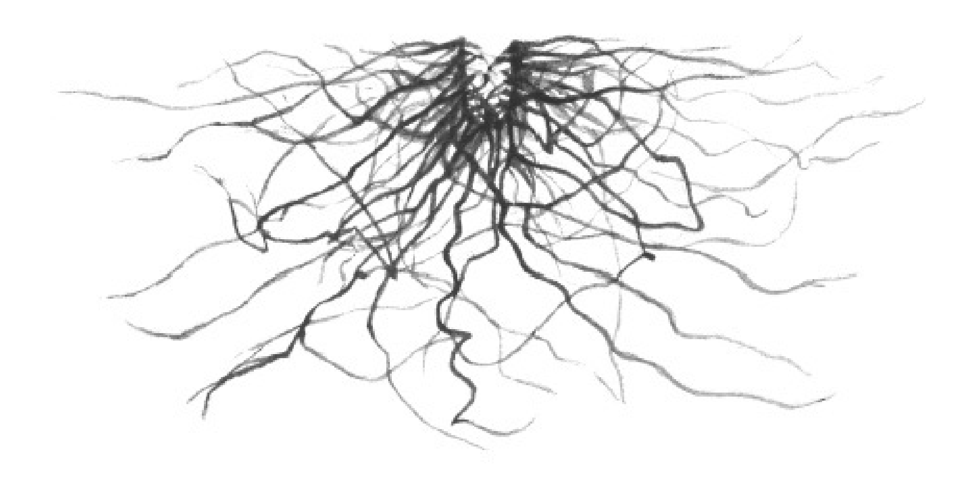
Miré hacia la copa del árbol. Su tronco, del que brotaban helechos y orquídeas, desaparecía en el dosel arbóreo entre una maraña de lianas. Encima de mí, un tucán alzó el vuelo con un graznido, y una manada de monos aulladores soltó un bramido quejumbroso. Aunque dejó de llover, las hojas que tenía encima vertieron gruesas gotas de agua formando lluvias repentinas. Una neblina baja levitaba sobre el suelo.

De la base del tronco sobresalían las raíces que, enseguida, desaparecían bajo la tupida hojarasca del suelo de la selva. Lo tanteé con un palo por si salían serpientes, pero solo se escabulló una tarántula. Me arrodillé y avancé a tientas por el tronco y por una de sus raíces hasta un mullido montón de detritos donde las raíces más finas se enroscaban en una espesa maraña colorada y parda. Me invadió un olor intenso. Las termitas treparon por el laberinto y un milípedo se enroscó haciéndose el muerto. Mi raíz desapareció bajo tierra pero con una palita despejé la zona. Con las manos y una cuchara aparté la capa superficial de tierra y cavé con delicadeza para descubrir cómo salía del árbol y se retorcía debajo de la tierra.

En una hora solo avancé un metro. Mi raíz empezó a ser más fina que un cordel y se ramificaba descontroladamente. Era difícil seguirle la pista porque se enredaba con sus vecinas, así que me tumbé para acercar la cara a la zanja superficial que había hecho. Algunas raíces olían intensamente a nuez y otras a madera amarga, pero al arañar las raíces del árbol en cuestión, estas desprendieron una picante nota resinosa. Durante horas avancé a paso de tortuga, raspando y oliendo cada palmo para no perderle el rastro.

A lo largo del día destapé más filamentos que brotaban de la raíz y seguí algunos hasta las cofias, que escarbaban en trocitos de hoja o ramitas podridas. Sumergí los extremos en un vial de agua para limpiarlos de barro y los observé con lupa. Era como un arbolito con raicillas cubiertas por una película pegajosa que parecía reciente. Allí estaban las delicadas estructuras que quería examinar. A partir de estas raíces se teje una red fúngica por el suelo y alrededor de las

raíces de los árboles cercanos. Sin esta malla de hongos mi árbol no existiría. Sin estas redes, ninguna planta existiría. Toda la vida terrestre, también la mía, dependía de estos sistemas. Tiré delicadamente de mi raíz y el suelo se movió.



# INTRODUCCIÓN

## ¿Cómo se vive siendo un hongo?

*Hay momentos en el amor húmedo que el cielo está celoso de lo que podemos hacer en la Tierra.*

**HAFIZ**

Los hongos están por doquier, pero cuesta verlos. Están en tu interior y a tu alrededor. Te mantienen a ti y a todo de lo que dependes. En este preciso momento, los hongos cambian el curso de la vida, y así lo vienen haciendo desde hace 1000 millones de años. Comen piedra, crean suelos, asimilan agentes contaminantes, se nutren de plantas pero también las matan, sobreviven en el espacio, provocan alucinaciones, producen alimentos, generan medicinas, manipulan el comportamiento animal e influyen en la composición de la atmósfera terrestre. Los hongos tienen la llave para entender nuestro planeta y nuestras formas de pensar, sentir y comportarnos. Aun así, sus vidas transcurren principalmente fuera de nuestra vista, y más del 90% de sus especies siguen sin clasificar. Cuanto más sabemos de los hongos, menos sentido tiene todo sin ellos.

Los hongos constituyen uno de los reinos naturales –en una categoría tan amplia y completa como la de los «animales» y las «plantas»–. Las levaduras microscópicas son hongos, como lo son las expansivas redes de hongos de miel, o *Armillaria*, uno de los mayores organismos del mundo. El poseedor del récord actual está en Oregón (Estados Unidos), pesa cientos de toneladas, abarca 10 $km^2$ y tiene entre 2000 y 8000 años de antigüedad. Seguramente hay especímenes más grandes y antiguos aún por descubrir.[1]

Muchos de los acontecimientos más dramáticos ocurridos en la Tierra han sido –y siguen siendo– resultado de la actividad de los hongos. Las plantas lograron salir del agua hace unos 500 millones de años gracias a su colaboración con los hongos, que ejercieron como sus sistemas radiculares durante decenas de millones de años hasta que las plantas pudieron desarrollar los suyos. Hoy, más del 90% de las plantas dependen de los hongos micorrícicos –del griego *mykes*

(hongo) y *rhiza* (raíz)– que comunican los árboles en redes compartidas a veces llamadas Wood Wide Web. Esta ancestral simbiosis dio origen a toda la vida reconocible en la Tierra, cuyo futuro depende de la capacidad ininterrumpida de plantas y hongos por establecer relaciones saludables.

Quizá las plantas hayan reverdecido el planeta, pero si pudiéramos retroceder al Devónico, hace 400 millones de años, descubriríamos sorprendidos otra forma de vida: los *Prototaxites*. Estos obeliscos vivientes crecían por toda la superficie terrestre. Muchos superaban la altura de un edificio de dos pisos. No había nada que se aproximara a este tamaño: había plantas pero no superaban el metro de altura, y los animales aún no habían salido del agua ni tenían espina dorsal. Los insectos pequeños anidaban en troncos grandes, excavando estancias y corredores con sus mandíbulas. Este insondable grupo de organismos –teóricamente hongos enormes– fueron las mayores estructuras vivientes en tierra firme durante, al menos, 40 millones de años, 20 veces más tiempo del que lleva el género *Homo* en la Tierra.[2]

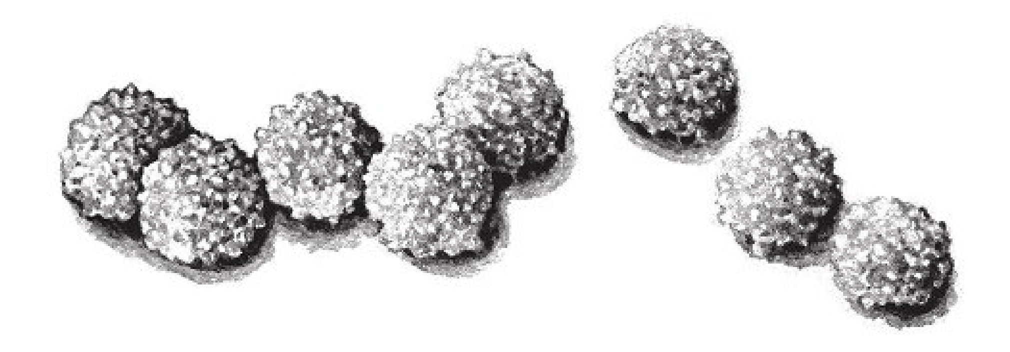
Hasta nuestros días, los hongos han fundado nuevos ecosistemas. Cuando se crean las islas volcánicas o cuando los glaciares retroceden y dejan al descubierto la piedra, los líquenes –una simbiosis de hongos con algas o bacterias– son los primeros organismos en formarse y en crear el suelo donde las plantas echarán raíces. En ecosistemas bien formados, la lluvia desarticularía rápidamente el suelo si no fuera por la densa malla de tejido fúngico que lo mantiene unido. Desde los sedimentos en el lecho marino hasta la superficie de los desiertos, los valles helados de la Antártida e incluso nuestros intestinos y orificios, hay pocos rincones en el globo en los que no haya hongos. En las hojas y tallos de una sola planta pueden existir decenas de miles de especies. Estos hongos se enredan tejiendo brocados en los huecos entre las células de las plantas para ayudarlas a defenderse de las enfermedades. No se ha descubierto ninguna planta que crezca en estado natural que no tenga estos hongos; forman parte del reino de las plantas como lo son las hojas o las raíces.[3]

La capacidad de los hongos para crecer en semejante variedad de hábitats depende de sus diversas aptitudes metabólicas. El metabolismo es el arte de la transformación química. Los hongos son magos del metabolismo y pueden explorar, buscar comida y salvarse de forma ingeniosa; sus capacidades solo pueden compararse a las de las bacterias. Los hongos utilizan cócteles de potentes encimas y ácidos para romper algunas de las sustancias más irreductibles del planeta, desde la lignina, el componente más resistente de la

madera, a la piedra, el petróleo crudo, los plásticos de poliuretano y los explosivos TNT. Algunos ecosistemas son demasiado extremos. Una especie identificada en vertidos mineros es uno de los organismos más resistentes a la radiación que se han descubierto jamás, y puede ayudar a limpiar lugares con residuos radioactivos. En el reactor nuclear que estalló en Chernóbil (Ucrania) habitan muchos de dichos hongos. Algunas de estas especies tolerantes a la radioactividad incluso se sienten atraídas hacia partículas radioactivas microscópicas y parecen ser capaces de aprovechar la radiación como fuente de energía, como hacen las plantas con la luz solar.[4]

Las setas presiden el imaginario colectivo cuando se piensa en hongos pero, como pasa con los frutos de las plantas que son un elemento más de una estructura mayor que incluye ramas y raíces, las setas son solo el cuerpo fructífero de los hongos, el lugar donde se producen las esporas. Los hongos utilizan las esporas como las plantas utilizan las semillas: para diseminarse. Las setas son la forma que tienen los hongos para rogar al mundo que les rodea, desde el viento a las ardillas, que les ayude con la dispersión de esporas, o para impedir al mundo ajeno a los hongos que interfiera en este proceso. Son las partes visibles, acres, codiciadas, deliciosas, venenosas del hongo. Sin embargo, las setas son solo uno de los muchos métodos que emplean: la inmensa mayoría de hongos no necesitan crear setas para liberar esporas.

Todos vivimos y respiramos hongos, gracias a las prolíficas habilidades de los cuerpos fructíferos de los hongos por dispersar esporas. Los hay que las liberan de forma explosiva, 10 000 veces más rápido que el lanzamiento de un transbordador espacial, a 100 km por hora –uno de los movimientos más rápidos conseguidos por un ser vivo–. Otras especies de hongos crean sus propios microclimas: las esporas son transportadas hacia arriba por una corriente de aire generada cuando las setas evaporan el agua de sus láminas. Los hongos producen unos 50 millones de toneladas de esporas cada año –lo que pesan 500 000 ballenas azules–, convirtiéndolas en la mayor fuente de partículas vivas en el aire. En las nubes hay esporas que influyen en el clima, por ejemplo, favoreciendo la creación de las gotitas de agua que forman la lluvia y de los cristales de hielo que forman la nieve, la aguanieve y el granizo.[5]



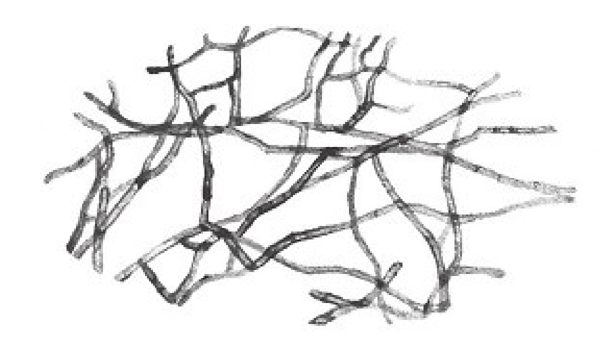
**Esporas.**

Algunos hongos, como las levaduras que transforman el azúcar en alcohol y fermentan la masa del pan, son unicelulares y se multiplican dividiéndose en dos. Sin embargo, la mayoría de hongos forman redes de muchas células conocidas como hifas: finas estructuras tubulares que se ramifican, se fusionan y se enredan en la anárquica filigrana de micelio. El micelio describe el hábito más común de los hongos, y no es tanto una cosa como un proceso –una tendencia irregular, de exploración–. El agua y los nutrientes fluyen por los ecosistemas a través de las redes de micelios. El micelio de algunas especies de hongos se excita por electricidad y transporta olas de actividad eléctrica por las hifas, de manera parecida a los impulsos eléctricos en las neuronas animales.[6]

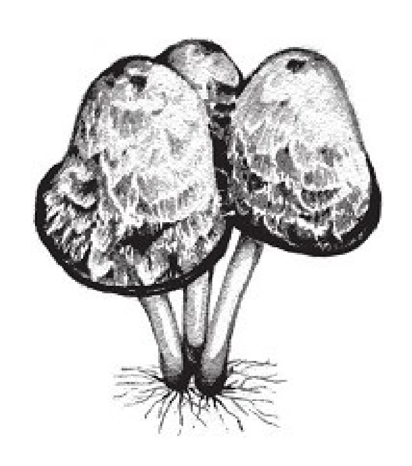
Las hifas crean micelio, pero también estructuras más especializadas. Los cuerpos fructíferos, como las setas, crecen del fieltro compacto de hilos de hifa. Aparte de expulsar esporas, estos órganos ejecutan muchas otras proezas. Algunos, como las trufas, desprenden aromas que las convierten en uno de los alimentos más preciados del planeta. Otros, como la matacandil *(Coprinus comatus)*, muestran singularidades muy curiosas: sin ser dura, puede atravesar el asfalto y levantar pesados adoquines. Una matacandil recién cogida se puede freír y comer pero si se deja varios días en un frasco, su carne blanca se deshace hasta licuar una tinta muy negra (las ilustraciones de este libro están hechas con tinta de *Coprinus*).[7]

Su ingenio metabólico permite a los hongos forjar una amplia variedad de relaciones. Las plantas, desde que son plantas, llevan hongos en sus raíces y brotes de los que dependen para nutrirse y protegerse. Los animales también dependen de los hongos. Después del hombre, los animales que forman algunas de las sociedades más grandes y complejas de la Tierra son las hormigas cortadoras de hojas. Las colonias pueden llegar a tener más de ocho millones de

individuos, con hormigueros subterráneos que pueden ser de más de 30 $m^2$. Las vidas de dichas hormigas giran en torno a un hongo que cultivan en cámaras cavernosas y al que alimentan con fragmentos de hoja.[8]



**Micelio.**



**Matacandil, *Corinus comatus*, dibujada con tinta de matacandil.**

Las sociedades humanas no están menos entrelazadas con los hongos. Las enfermedades causadas por los hongos provocan miles de millones de pérdidas –el hongo tizón de arroz daña una cantidad de arroz lo bastante grande para alimentar a más de 60 millones de personas cada año–. Las enfermedades que sufren los árboles por culpa de los hongos, desde la enfermedad holandesa del olmo al cancro del castaño, transforman bosques y paisajes. Los romanos rezaban a Robigus, la diosa del mildiu, para evitar enfermedades fúngicas pero no pudieron detener las hambrunas que contribuyeron a la caída del Imperio romano. El impacto de dichas afecciones en el mundo es cada vez mayor: las prácticas agrícolas insostenibles reducen la capacidad de las plantas para establecer relaciones con los hongos beneficiosos de los que dependen. El empleo extendido de fungicidas ha provocado un aumento sin precedentes de

nuevas superbacterias fúngicas que amenazan la salud de los seres humanos y de las plantas. Mientras los seres humanos dispersemos hongos que causan enfermedades, les damos nuevas oportunidades para su evolución. En los últimos 50 años, el comercio humano ha expandido la enfermedad más mortífera jamás registrada –un hongo que infecta anfibios– por todo el planeta. Ha extinguido 90 especies de anfibios y pone en peligro a otro centenar más. La variedad de banana Cavendish, que representa el 99% de las exportaciones de banana en todo el mundo, está siendo diezmada por una enfermedad fúngica y se enfrenta a su total desaparición en las próximas décadas.[9]

Sin embargo, al igual que las hormigas cortadoras de hojas, los seres humanos hemos aprendido a usar los hongos para solucionar problemas urgentes. De hecho, seguramente llevamos más tiempo utilizando remedios fúngicos que siendo *Homo sapiens.* En el 2017, los investigadores reconstruyeron las dietas de los neandertales, nuestros pretéritos antepasados que se extinguieron hace unos 50 000 años. Descubrieron que un individuo con un forúnculo dental había estado comiendo un tipo de hongo, un moho productor de penicilina, y que seguramente conocía sus propiedades antibióticas. Hay otros ejemplos no tan pretéritos, como el «Hombre de Hielo» (Ötzi), un cuerpo perfectamente conservado del Neolítico descubierto en hielo de glaciar, de hace 5000 años aproximadamente. El día que murió, el Hombre de Hielo llevaba un morral con manojos de yesqueros *(Fomes fomentarius)* que probablemente utilizara para encender fuego, y con trocitos de yesquero del abedul *(Fomitopsis betulina)* cuidadosamente dispuestos que seguramente usara como medicina.[10]

Los pueblos aborígenes de Australia trataban las heridas con moho que extraían del lado de sombra de los eucaliptos. En el Talmud judío aparece un remedio conocido como «chamka», que consiste en maíz enmohecido impregnado de vino de dátiles. Antiguos papiros egipcios del año 1500 a.C. mencionan las propiedades curativas del moho, y en 1640 el herbolario del rey en Londres, John Parkinson, describió la utilización de hongos para tratar heridas. Pero no fue hasta hace poco, en 1928, que Alexander Fleming descubrió un hongo que producía un compuesto químico llamado penicilina, capaz de matar las bacterias. La penicilina se convirtió en el primer antibiótico moderno y ha salvado innumerables vidas desde entonces. El descubrimiento de Fleming marcó un hito en la medicina moderna y, sin duda, ayudó a mover la balanza del poder en la II Guerra Mundial.[11]

La penicilina, un compuesto que protegía a los hongos de la infección

bacteriana, acabó protegiendo también a los seres humanos. Tampoco es tan raro: aunque tradicionalmente los hongos siempre se han agrupado con las plantas, en realidad tienen vínculos más estrechos con los animales –un ejemplo de error categorial que suelen cometer los investigadores en su afán por entender las vidas de los hongos–. A nivel molecular, los hongos y los seres humanos son bastante parecidos como para beneficiarse de muchas de las mismas innovaciones bioquímicas. Cuando utilizamos fármacos elaborados con hongos, a menudo tomamos prestada una solución fúngica y la realojamos en nuestro cuerpo. En farmacia se utilizan muchos hongos para hacer otros muchos productos químicos imprescindibles aparte de la penicilina: la ciclosporina (un fármaco inmunosupresor que permite llevar a cabo trasplantes de órganos), las estatinas para reducir el colesterol, muchos potentes antivirales y compuestos anticancerígenos (incluido el muy vendido Taxol, que al principio se extraía de los hongos alojados en los tejos), por no hablar del alcohol (fermentado por una levadura) y la psilocibina (el componente activo en setas alucinógenas que en ensayos clínicos recientes se ha demostrado que podría ayudar a combatir la depresión y la ansiedad agudas). El 60% de las enzimas utilizadas en la industria están generadas por hongos, y el 15% de todas las vacunas están producidas por cepas manipuladas de hongos levaduriformes. Los hongos producen el ácido cítrico que se emplea en todas las bebidas gaseosas. El mercado global de hongos comestibles crece y se calcula que va a aumentar de los 42 000 millones de US$ del 2018 a los 69 000 millones de US$ en el 2024. No en vano, las ventas de setas medicinales crecen cada año.[12]

El empleo de remedios fúngicos no se ciñe solo a la salud de los seres humanos. Las tecnologías fúngicas radicales nos pueden ayudar a reaccionar ante algunos de los muchos problemas que trae la devastación medioambiental vigente. Así, los compuestos antivirales producidos con micelio fúngico reducen el problema de la desaparición de colonias de abejas. La voracidad de los hongos se puede emplear para descomponer contaminantes como el crudo de los vertidos de petróleo, en un proceso conocido como «micorremediación». Con la «micofiltración», el agua contaminada se pasa por rejillas de micelio que filtran los metales pesados y degradan las toxinas. Con la «micofabricación» se pueden construir materiales de construcción y tejidos a partir del micelio para sustituir, en ocasiones, los plásticos y la piel. Las melaninas fúngicas, los pigmentos producidos por hongos tolerantes a la radiación, son una nueva y potencial fuente de biomateriales resistentes a la radiación.[13]

Las sociedades humanas siempre han girado en torno a los prodigiosos metabolismos de los hongos. Se tardarían meses en recitar la lista completa de los logros de los hongos. Y pese a su potencial y al papel fundamental que ejercen en muchas fascinaciones de los hombres desde tiempos inmemoriales, los hongos han recibido mucha menos atención que la prestada a animales y plantas. El mejor cálculo sugiere que hay entre 2,2 y 3,8 millones de especies de hongos en el mundo –de 6 a 10 veces más que el número estimado de especies de plantas–, o sea que solo se han descrito un 6% de especies de hongos. Tan solo estamos empezando a entender las complejidades y sofisticaciones de las vidas de los hongos.[14]

Que yo recuerde, siempre me han fascinado los hongos y las transformaciones que provocan. Un tronco macizo se pulveriza, la masa sube hasta convertirse en pan, una seta aparece de la noche a la mañana –¿pero cómo?–. Cuando era adolescente, lidié con ese desconcierto buscando las maneras para involucrarme con los hongos. Recogí setas, y cultivé setas en mi habitación. Más tarde, destilé alcohol con la esperanza de conocer mejor la levadura y sus efectos. Me encantaba ver cómo la miel se convertía en hidromiel, y el zumo de fruta en vino –y cómo el producto de estas transformaciones podía alterar mis sentidos y los de mis amigos.

Y cuando empecé a estudiar oficialmente los hongos, como estudiante universitario en el Departamento de Ciencias de las Plantas de Cambridge –no hay Departamento de Ciencias de los Hongos–, me quedé fascinado con la simbiosis, con las estrechas relaciones que establecen organismos sin parentesco alguno. La historia de la vida resultó estar llena de colaboraciones íntimas. Aprendí que la mayoría de las plantas dependen de los hongos para abastecerse de los nutrientes del suelo, como fósforo y nitrógeno, a cambio de las fuentes de energía como azúcares y lípidos que producen en la fotosíntesis –el proceso por el que las plantas absorben luz y anhídrido carbónico del aire–. La relación entre hongos y plantas dio lugar a la biosfera tal y como la conocemos y permite la vida en la Tierra hasta la fecha, pero parecía que entendíamos muy poco. ¿Cómo empezaron dichas relaciones? ¿Cómo se comunican las plantas y los hongos entre sí? ¿De qué manera podía conocer mejor estos organismos?

Acepté hacer un doctorado para estudiar relaciones micorrícicas en los bosques tropicales de Panamá. Poco después, me trasladé a una estación de campo gestionada por el Smithsonian Tropical Research Institute. Las islas y las penínsulas aledañas estaban integradas en una reserva natural enteramente cubierta de selva salvo un claro donde estaban los dormitorios, una cantina y los laboratorios. Había invernaderos para el cultivo de plantas, armarios de secado llenos de bolsas de hojarasca, una sala con microscopios y un gran congelador lleno de muestras: botellas con savia de árboles, murciélagos muertos, probetas con garrapatas extraídas a ratas espinosas (equimíidos) y boas constrictor. En el tablón de anuncios había carteles que ofrecían una recompensa en metálico a quienes trajeran heces frescas de ocelote.

La selva rebosaba de vida. Había perezosos, pumas, serpientes, cocodrilos...; había basiliscos comunes que corrían sobre el agua. En pocas hectáreas había tantas especies de plantas leñosas como en toda Europa. La biodiversidad del bosque quedaba reflejada por la enorme variedad de biólogos de campo que estaban allí estudiándola. Los había subidos a los árboles para observar las hormigas. Otros partían cada día al alba para seguir a los monos. Algunos monitorizaban los árboles que habían sufrido el impacto de un relámpago en alguna tormenta tropical. Había quien se pasaba días enteros suspendido de una grúa midiendo las concentraciones de ozono en el dosel arbóreo. Y los había que calentaban el suelo con instrumentos electrónicos para saber cómo podrían reaccionar las bacterias al calentamiento global. También estaban los que estudiaban cómo se guiaban los escarabajos con las estrellas. Abejorros, orquídeas, mariposas..., no había ser vivo en el bosque que no lo estudiara alguien.

Me quedé estupefacto por la creatividad y sentido del humor de esta comunidad de investigadores. Los biólogos de laboratorio pasan gran parte de su tiempo estudiando pedacitos de vida. Sus propias vidas las viven fuera de los frascos que contienen el objeto que estudian. Los biólogos de campo difícilmente tienen tanto control. El mundo es su matraz y ellos viven en él. La balanza de poder es distinta. Las tormentas barren las banderas que señalan sus experimentos. Los árboles caen en sus parcelas. Los perezosos se mueren precisamente allí donde planeaban medir los nutrientes en el suelo. Las hormigas bala les pican cuando se tropiezan con ellas. El bosque y sus moradores disipan cualquier ilusión que puedan tener los responsables de la investigación. Rápidamente se instala la humildad.

Las relaciones entre plantas y hongos micorrícicos son clave para entender cómo funcionan los ecosistemas. Quería aprender cómo pasaban los nutrientes por las redes de los hongos pero con solo pensar que sucedía bajo tierra sentí vértigo. Las plantas y los hongos micorrícicos son promiscuos: muchos hongos pueden vivir en las raíces de una sola planta, y muchas plantas pueden conectar con una sola red fúngica. De esta manera, diversas sustancias, desde nutrientes a compuestos señalizadores, pueden pasar entre plantas a través de conexiones fúngicas. Hablando en plata, las plantas tienen vida social gracias a los hongos. Es lo que se conoce como la Wood Wide Web (red de conexiones subterráneas entre los árboles). En los bosques tropicales en los que trabajé habitaban centenares de especies de plantas y de hongos. Estas redes revisten una complejidad inconcebible, sus consecuencias son enormes y aún se entienden muy poco. Imagínese la perplejidad de un antropólogo extraterrestre que descubriera, tras décadas estudiando la humanidad actual, que teníamos algo llamado internet. Pues más o menos así es como se sienten los ecologistas contemporáneos.

En mis esfuerzos por investigar las redes de hongos micorrícicos que se expanden bajo tierra, recopilé miles de muestras de suelo y de raíces de árboles y las trituré para conseguir una pasta de la que extraer sus grasas, o ADN. Planté centenares de plantas en macetas con diferentes comunidades de hongos micorrícicos y medí cuánto crecían sus hojas. Rocié con abundante pimienta negra los invernaderos para impedir que se colaran gatos e introdujeran con ellos comunidades de hongos intrusos del exterior. Espolvoreé las plantas con productos químicos y seguí la pista de dichos productos hasta las raíces y el suelo para poder calibrar cuánto había pasado a sus hongos asociados –más trituraciones y más pastas–. Recorrí penínsulas selváticas en una motora pequeña que a menudo se averiaba, trepé por cascadas buscando plantas insólitas, anduve muchos kilómetros penosamente por senderos embarrados llevando una mochila llena de tierra empapada, y conduje camiones por montículos de pastoso lodo rojo de la selva.

De los muchos organismos que habitaban en el bosque lluvioso, me cautivaron unas florecillas que brotaban del suelo. No eran más altas que una taza de café y tenían tallos larguiruchos y blancos con una única flor azul en equilibrio en el ápice del tallo. Eran una especie de genciana selvática llamada *Voyria* que hacía mucho tiempo habían perdido la capacidad para hacer la fotosíntesis y, de paso, su clorofila, el pigmento que, precisamente, permite a las

plantas hacer la fotosíntesis y ser verdes. Las *Voyria* me dejaron desconcertado: si la fotosíntesis es uno de los procesos que hacen que las plantas sean plantas, ¿cómo podían estas flores sobrevivir sin ella?

Sospeché que las *Voyria* tenían una relación atípica con sus hongos socios y me pregunté si dichas flores podrían descubrirme algo de lo que ocurría bajo tierra. Me pasé muchas semanas buscando *Voyria* en la selva. Algunas eran fáciles de localizar porque crecían en claros del bosque. Otras se escondían, camufladas detrás de raíces contrafuerte. Podía haber centenares de flores en una superficie equivalente a una cuarta parte de un campo de fútbol, y tenía que contarlas todas. El bosque raras veces es abierto o plano, o sea que tenía que trepar o encorvarme. En realidad, hacía de todo menos andar. Cada tarde regresaba sucio y hecho polvo al campamento base. Durante la cena, mis colegas ecologistas holandeses soltaban alguna broma sobre mis adorables flores con sus tallos frágiles. Ellos estudiaban cómo los bosques tropicales almacenaban carbono. Así, mientras yo avanzaba bizqueando a ras de suelo por encontrar las diminutas flores, ellos medían la circunferencia de los árboles. En un balance de carbono del bosque, las *Voyria* son insignificantes. Mis amigos holandeses me tomaban el pelo sobre mi ecología en miniatura y mis delicados intereses. Y yo me burlaba de su ecología tosca y su machismo. Al día siguiente al alba, volvería a salir para observar de cerca el suelo con la esperanza de que estas curiosas plantas me ayudaran a encontrar el camino a seguir hasta este mundo subterráneo, oculto y rico.

Ya sea en los bosques, los laboratorios, o las cocinas, los hongos han cambiado mi visión de cómo ocurre la vida. Estos organismos plantean interrogantes sobre nuestras categorías y, al pensar en ellos, el mundo adquiere una dimensión diferente. Fue mi creciente deleite en que su poder cambiara mi visión el que me empujó a escribir este libro. He intentado encontrar la manera de disfrutar de las ambigüedades que presentan los hongos, pero no siempre es fácil sentirse cómodo en el espacio creado por cuestiones sin resolver. La agorafobia puede hacer acto de presencia. Es tentador esconderse en salas pequeñas construidas a partir de respuestas rápidas. He hecho todo lo posible por contenerme.

Un amigo mío, el filósofo e ilusionista David Abram, era el mago de la casa del Alice’s Restaurant en Massachusetts (famoso gracias a la canción de Arlo Guthrie). Todas las noches se pasaba por las mesas jugueteando con monedas

entre sus dedos; estas reaparecían en lugares inesperados, volvían a desaparecer, se multiplicaban por dos y se quedaban en nada. Una noche, dos clientes regresaron al restaurante poco después de salir y llevaron a David a un rincón aparte, parecían preocupados. Le dijeron que cuando habían salido del restaurante, el cielo les había parecido de un color asombrosamente azul, y las nubes, grandes e intensas. ¿Había puesto algo en sus bebidas? Y siguió sucediendo durante las siguientes semanas: los clientes volvían para decirle que el tráfico les había parecido más atronador que antes, las farolas más luminosas, los motivos de las aceras más interesantes o la lluvia más refrescante. Con los trucos de magia, la gente percibía el mundo de una manera diferente.

David me explicó qué creía que pasaba. Nuestras percepciones funcionan, en gran parte, por expectativas. Cuesta menos esfuerzo cognitivo encontrarle el sentido al mundo utilizando imágenes preconcebidas actualizadas con una pequeña dosis de nueva información sensorial que estar formando constantemente percepciones totalmente nuevas desde cero. Nuestras ideas preconcebidas crean los puntos flacos donde trabajan los magos. Ya de por sí, los trucos con monedas aflojan el control de nuestras expectativas por saber cómo funcionan las monedas y las manos. Y acaban por aflojar el asidero de nuestras expectativas sobre nuestras percepciones en general. Al salir del restaurante, el cielo parecía diferente porque los clientes vieron el cielo tal y como era allí y entonces, y no como esperaban que fuera. Desengañados de nuestras expectativas, nos apoyamos en nuestros sentidos. Lo increíble es el abismo que hay entre lo que esperamos encontrar y lo que encontramos cuando miramos de verdad.[15]

Los hongos también nos desengañan con nuestras ideas preconcebidas. Sus vidas y comportamientos son sorprendentes. Cuanto más los estudio, más disminuyen mis expectativas y más conceptos familiares empiezan a dejar de serlo. Dos campos crecientes de investigación biológica me han ayudado a manejar estos estados de sorpresa y me han facilitado marcos para guiarme en mi exploración del mundo de los hongos.

El primero es un conocimiento de los muchos comportamientos sofisticados y solucionadores de problemas que se han desarrollado en organismos sin cerebro fuera del reino animal. Los ejemplos más conocidos son los mohos mucilaginosos, como el *Physarum polycephalum* (aunque son amebas y no hongos, como sí lo son los mohos de verdad). Tal y como veremos, los mohos mucilaginosos no tienen el monopolio de los organismos resolutivos sin cerebro

pero son fáciles de estudiar y se han convertido en organismos representativos que han abierto nuevos canales de investigación. Los *Physarum* forman sistemas de exploración hechos de venas similares a los tentáculos y no tienen sistema nervioso central –ni nada que se le parezca–. Aun así pueden 'tomar decisiones' al comparar un abanico de posibles trayectorias de acción y son capaces de encontrar el camino más corto entre dos puntos de un laberinto. Los investigadores japoneses liberaron moho mucilaginoso en placas de Petri que representaban el área metropolitana de Tokio en miniatura. Los copos de avena representaban importantes centros urbanos, y las luces, obstáculos como montañas –a los mohos mucilaginosos no les gusta la luz–. Al día siguiente, los mohos mucilaginosos habían encontrado la ruta más conveniente entre los copos de avena, tejiendo una red prácticamente idéntica a la actual red ferroviaria de Tokio. En experimentos similares, los mohos mucilaginosos han recreado el sistema de autopistas de Estados Unidos y la red de calzadas romanas en Europa central. Un entusiasta de los mohos mucilaginosos me explicó un experimento que había realizado. En las tiendas de IKEA se solía perder y le costaba encontrar la salida. Entonces decidió desafiar a sus mohos mucilaginosos con el mismo problema y construyó un laberinto con el mismo diseño de planta de la tienda IKEA de su barrio. Como era de esperar, sin ninguna señal ni personal que les indicara la salida, los mohos mucilaginosos pronto encontraron el camino más corto para salir. «¿Lo ves? –me dijo riendo–, son más listos que yo.»[16]

Que se los llame mohos mucilaginosos, hongos o plantas 'inteligentes' depende del punto de vista. Cuando los científicos definen el concepto «inteligencia» suelen recurrir al ser humano como referencia para medir al resto de especies. Según estas definiciones antropocéntricas, los humanos siempre encabezan las clasificaciones de inteligencia, seguidos de animales similares a nosotros (chimpancés, bonobos, etc.), seguidos de nuevo por otros animales 'superiores', y de forma ascendente y descendente en una tabla de clasificación –una fantástica cadena de inteligencia trazada por los antiguos griegos que, de una forma u otra, persiste hasta la fecha–. Como estos organismos no se parecen a nosotros ni, de entrada, se comportan como nosotros –ni tienen cerebros–, han sido colocados en las últimas posiciones de la lista. Demasiado a menudo, se ha creído que son como un telón de fondo inerte para la vida animal. Pero lo cierto es que muchos son capaces de tener comportamientos sofisticados que nos obligan a pensar con otras perspectivas lo que significa para los organismos «resolver problemas», «comunicar», «tomar decisiones», «aprender» y

«recordar». Cuando lo hacemos así, algunas de las jerarquías molestas que apoyan el pensamiento moderno empiezan a suavizarse. Y mientras se ablandan, nuestras actitudes destructivas hacia el mundo que no es humano pueden empezar a cambiar.[17]

El segundo campo de investigación que me ha guiado en esta indagación está relacionado en cómo pensamos sobre los organismos microscópicos –o microbios– que cubren cada centímetro del planeta. En los últimos 40 años, las nuevas tecnologías nos han permitido algo impensable hasta hace poco: acceder a las vidas de los microbios. ¿El resultado? Para tu comunidad microbiana –tu «microbioma»–, tu cuerpo es un planeta. Algunos prefieren el bosque templado de tu cuero cabelludo, otros las áridas planicies de tu antebrazo y algunos el bosque tropical de tu entrepierna o axila. Tus intestinos (que si los desplegáramos ocuparían una superficie de 32 $m^2$), orejas, dedos de los pies, boca, ojos, piel, y cada superficie, conducto y cavidad que tienes están infestados de bacterias y hongos. Llevas más microbios encima que células 'propias'. Hay más bacterias en tus intestinos que estrellas en el firmamento.[18]

Para el ser humano, identificar dónde acaba un individuo y empieza otro no suele ser algo en lo que normalmente pensemos. Se suele dar por sentado –al menos en las sociedades industriales modernas– que empezamos donde empieza nuestro cuerpo y terminamos donde este termina. Los avances en la medicina moderna, como los trasplantes de órganos desdibujan estas distinciones; las novedades en la microbiología las sacuden desde los cimientos. Somos ecosistemas, compuestos de –y descompuestos por– una ecología de microbios, cuyo significado tan solo empieza a conocerse. Los más de 40 billones de microbios que viven en nuestros cuerpos y a su alrededor nos permiten digerir alimentos y producir minerales clave que nos nutren. Como pasa con los hongos que viven en las plantas, nos protegen de las enfermedades. Guían el desarrollo de nuestros cuerpos y sistemas inmunológicos e influyen en nuestro comportamiento. Si no se mantienen bajo control, pueden enfermarnos e incluso matarnos. No somos ninguna excepción. Incluso las bacterias tienen virus en su interior (¿un nanobioma?) y hasta los virus albergan virus más pequeños (¿un picobioma?). La simbiosis es un rasgo omnipresente de la vida.[19]

Asistí a una convención en Panamá sobre microbios tropicales y me pasé tres días, junto a muchos otros investigadores, con un total desconcierto por las conclusiones a las que llegábamos. Hubo alguien que habló de un grupo de plantas cuyas hojas producían un cierto tipo de sustancias químicas. Hasta

entonces, se creía que era una característica que definía a ese grupo de plantas. Sin embargo, se supo que las sustancias químicas en realidad las hacían los hongos que vivían en las hojas de la planta. Teníamos que redibujar nuestra idea de la planta. Otro investigador interrumpió, sugiriendo que quizá no eran los hongos que habitaban en el interior de la hoja los que producían dichas sustancias químicas sino las bacterias que vivían dentro de los hongos. El debate siguió por estos derroteros. Después de dos días, la noción de individuo se amplió y se expandió más allá del entendimiento. Hablar de individuos ya no tenía sentido. La biología –la ciencia que estudia los seres vivos– se había convertido en ecología –el estudio de las relaciones entre los seres vivos–. Y para complicarlo aún más, entendíamos muy poco. Los gráficos de poblaciones microbianas proyectados en una pantalla contaban con grandes secciones etiquetadas como «desconocido». Me recordó la manera como los físicos modernos retratan el universo, el 90% del cual se describe como «materia oscura» y «energía oscura». La materia y la energía son oscuras porque no sabemos nada de ellas. Esto era materia biológica oscura, o vida oscura.[20]

Muchos conceptos científicos –desde el tiempo a los 'enlaces químicos', los genes y las especies– carecen de definiciones estables pero siguen siendo categorías útiles con las que pensar. Desde una perspectiva, el concepto «individuo» no es diferente: solo otra categoría para guiar el pensamiento y comportamiento humanos. No obstante, hay tanto de la vida y la experiencia cotidianas –por no hablar de nuestros sistemas filosóficos, políticos y económicos– que dependen del individuo, que puede ser difícil quedarse quieto y ver cómo el concepto se disuelve. ¿Dónde deja esto al «nosotros»? ¿Qué pasa con el «ellos»? ¿El «yo»? ¿El «mío»? ¿El «todos»? ¿El «cualquiera»? Mi respuesta a los debates en la convención no era meramente intelectual. Al igual que un cliente del Alice's Restaurant, me sentía diferente: lo que antes me era familiar ahora era un misterio. Una eminencia en el campo de la investigación del microbioma observó que la «pérdida de un sentido de autoconcepto, delirios de autoconcepto y experiencias de 'control ajeno'» eran todos síntomas potenciales de enfermedad mental. Me hizo reflexionar en cuántas ideas teníamos que reconsiderar, sobre todo nuestras nociones culturalmente valiosas de identidad, autonomía e independencia. En parte es esta sensación de desconcierto la que hace que los avances en microbiología sean tan emocionantes. Nuestras relaciones microbianas son tan íntimas como cualquier otra. Conocer mejor estas asociaciones cambia cómo vivimos nuestros propios

cuerpos y los lugares en los que habitamos. «Nosotros» somos ecosistemas que rebasan fronteras y vulneran categorías. Nosotros mismos salimos de una compleja maraña de relaciones que justo acaba de empezar a conocerse.[21]

El estudio de las relaciones puede ser confuso. Casi todas son ambiguas ¿Las hormigas cortadoras de hojas han domesticado el hongo del que dependen o el hongo ha domesticado a las hormigas? ¿Son las plantas las que cultivan los hongos micorrícicos con los que habitan, o los hongos cultivan las plantas? ¿Qué camino hay que seguir? Esta incertidumbre es saludable.

Tuve un profesor llamado Oliver Rackham, un ecologista e historiador, que estudiaba de qué manera los ecosistemas habían formado –y habían sido formados por– las culturas humanas durante miles de años. Nos llevaba a los bosques próximos y nos contaba la historia de esos lugares y de sus habitantes humanos mientras leía los nudos y hendiduras en las ramas de viejos robles, observaba dónde brotaban ortigas, y anotaba qué plantas crecían o no en un seto. Gracias a Rackman, esa línea nítida que creía que dividía la «naturaleza» y la «cultura» empezaba a desdibujarse.

Más tarde, mientras hacía trabajo de campo en Panamá, me topé con muchas relaciones complicadas entre los biólogos de campo y los organismos que estudiaban. Dije en broma a los científicos que estudiaban a los murciélagos que si trasnochaban y se pasaban el día durmiendo, adquirirían malos hábitos (*). Me preguntaron qué huellas estaban dejando en mí los hongos. Pues la verdad es que aún no estoy seguro. Pero sigo preguntándome cómo, en nuestra dependencia total de los hongos –como regeneradores, recicladores y tejedores de redes que unen mundos– podríamos estar bailando a su son más a menudo de lo que nos percatamos.

Y si lo hacemos, es fácil olvidarse. Muy a menudo, demasiado, me vuelvo objetivo y contemplo el suelo como un lugar abstracto, un ruedo difuso para interacciones esquemáticas. Mis colegas y yo decimos cosas como: «Fulano de tal constató un incremento aproximado del 25% del carbono del suelo de la estación seca a la estación de lluvias». ¿Qué vamos a decir, si no? No tenemos forma de experimentar la naturaleza del suelo y las innumerables vidas que prosperan en él.

Lo intenté con las herramientas de las que disponía. Mis muestras, que se contaban a miles, se procesaban a través de máquinas caras que agitaban, radiaban y transformaban el contenido de mis tubos en secuencias de números. Me pasé meses enteros mirando por el microscopio, inmerso en paisajes de raíces llenos de sinuosas hifas congeladas en ambiguos apareamientos con células de plantas. Aun así, los hongos que veía estaban muertos, embalsamados y reproducidos en falsos colores. Me sentía como un detective patoso. Mientras me pasaba semanas de cuclillas recopilando barro en pequeñas probetas, los tucanes graznaban, los monos aulladores bramaban, las lianas se enredaban y los osos hormigueros lamían. No podía acceder a las vidas microbianas, sobre todo las subterráneas, como sí se podía acceder al carismático y rebosante mundo de la superficie. Para que mis descubrimientos cobraran vida, crecieran y contribuyeran así al conocimiento general, se necesitaba imaginación. No había otro camino.

En los círculos científicos, hablar de imaginación es hablar de especulación y no se confía mucho en ella; en las publicaciones científicas viene acompañada de un obligado «aviso para navegantes». Escribir sobre investigación consiste, en parte, en dejarla limpia de ilusiones, pruebas improductivas y miles de ensayos experimentales y errores que han dado lugar incluso a descubrimientos ínfimos. No todos los que leen un estudio tienen ganas de conocer de forma exhaustiva los pelos y señales del proceso. Además, los científicos tienen que parecer creíbles. Si se entra a hurtadillas entre bastidores quizá la gente no esté muy presentable. Ni siquiera entre bastidores, ni en conversaciones a altas horas con mis colegas, era normal entrar en detalles de cómo habíamos imaginado –accidental o deliberadamente– los organismos que estudiábamos, ya fueran peces, bromelias, lianas, hongos o bacterias. Resultaba incluso incómodo admitir que el embrollo de nuestras infundadas conjeturas, fantasías y metáforas podría haber ayudado a dar forma a nuestra investigación. En cualquier caso, la imaginación forma parte de la tarea cotidiana de investigar. La ciencia no es un ejercicio de racionalidad a sangre fría. Los científicos son –y siempre han sido– sensibles, creativos, intuitivos, seres humanos completos, que hacen preguntas sobre un mundo que nunca se hizo para ser catalogado ni sistematizado. Cada vez que preguntaba qué estaban haciendo estos hongos y diseñaba estudios para probar y entender sus comportamientos, no me quedaba otra que imaginármelos.

Un experimento me obligó a hurgar en los recovecos más recónditos de mi imaginación científica. Me apunté para participar en un estudio clínico sobre los

efectos del LSD en las capacidades de científicos, ingenieros y matemáticos para solucionar problemas. El estudio formaba parte del gran resurgimiento del interés científico y médico por el potencial desaprovechado de las drogas sicodélicas. Los investigadores querían saber si el LSD podía hacer que los científicos accedieran a su inconsciente profesional y así ayudarles a tratar problemas observados desde ángulos nuevos. Nuestras imaginaciones, normalmente arrinconadas, tenían que ser las estrellas del espectáculo, fenómenos que tenían que ser observados e incluso medidos. Se contrató a un variopinto grupo de jóvenes investigadores que habían visto los carteles colgados en los departamentos de ciencia de todo el país («¿Tienes un problema valioso que necesitas resolver?»). Era un estudio atrevido, pues es bien sabido que cuesta mucho organizar avances creativos en cualquier sitio, y mucho menos en la unidad de ensayos clínicos de un hospital con drogas.

Los investigadores que organizaban el experimento habían colgado dibujos sicodélicos en las paredes, instalado unos altavoces para la música y encendido «luces de colores relajantes». Intentaron *desclinicalizar* el entorno, pero lo hacían más artificial; tuvieron que aceptar el impacto que ellos –los científicos– podrían tener sobre su sujeto a estudiar. Era un tinglado que hacía visibles muchas de las razonables inseguridades a las que se enfrentaban los investigadores cada día. Si los sujetos de todos los experimentos biológicos se hubieran acompañado con su luz suave y música relajante correspondientes, quizá se habrían comportado de forma muy distinta.

Las enfermeras se aseguraron que me bebía el LSD a las 9.00 en punto. No me quitaron el ojo de encima hasta que no me terminé la copita con el líquido mezclado con agua. Me tumbé en la cama de mi habitación de hospital y me extrajeron una muestra de sangre del brazo. Tres horas más tarde, cuando había alcanzado la ‘altitud de crucero’, mi asistente poco a poco me animó a pensar en mi «problema relacionado con el trabajo». Durante las pruebas psicométricas y valoraciones de personalidad que habíamos completado antes del *trip*, se nos había pedido que describiéramos nuestros problemas con todo lujo de detalles –esos nudos que nos impedían avanzar en nuestras investigaciones–. Quizá si se mojaban con LSD esos nudos se desharían. Todas mis preguntas versaban sobre hongos y me consoló saber que el LSD inicialmente se extraía de un hongo que vive en plantas de cultivo; una solución fúngica que acabaría con mis problemas con los hongos. ¿Qué pasaría?

Quería aprovechar mi experimento con LSD para pensar también en

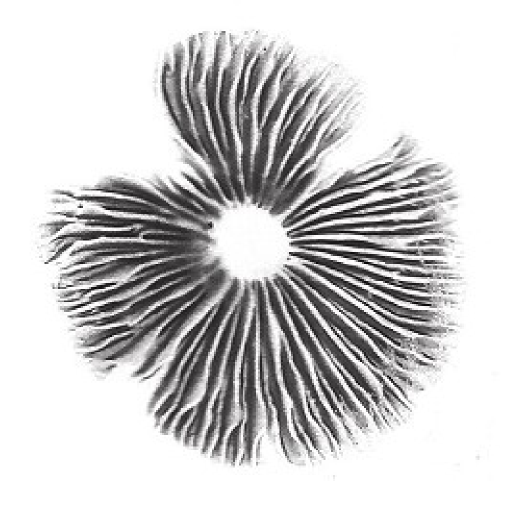
profundidad sobre las vidas de las flores azules, *Voyria*, y sus relaciones con los hongos. ¿Cómo pueden vivir sin fotosíntesis? Casi todas las plantas absorben minerales de las redes de hongos micorrícicos en el suelo para poder vivir, y así lo hacían las *Voyria*, a juzgar por el matojo de hongos que se enredaba en sus raíces. Pero sin fotosíntesis, las *Voyria* no podían producir los azúcares y lípidos ricos en energía que necesitaban para crecer. ¿De dónde sacaban la energía? ¿Podían estas flores sustraer sustancias a otras plantas verdes a través de las redes fúngicas? De ser así, ¿las *Voyria* ofrecían algo a cambio a sus socios fúngicos, o eran meros parásitos, *hackers* de la Wood Wide Web?

Tumbado en la cama de hospital y con los ojos cerrados, me preguntaba cómo se vive siendo un hongo. Me visualicé bajo tierra, rodeado por brotes que crecían entrelazados entre sí. Bancos de animales globulares pastando raíces de plantas y su premura, pastando el 'Salvaje Oeste' del suelo –todos esos bandidos, forajidos, llaneros solitarios, jugadores de dados–. El suelo eran vísceras destripadas sin horizonte –digestión y detritos por doquier–, rebaños de bacterias surfeando sobre olas con cargas eléctricas –sistemas climatológicos químicos–, autopistas subterráneas –viscoso abrazo infeccioso–, furioso contacto íntimo por todos lados. Al seguir la hifa de un hongo hasta una raíz cavernosa, me quedé estupefacto por el refugio que me ofrecía. No había apenas otros tipos de hongos allí; y por supuesto ni rastro de gusanos e insectos. Había menos frenesí. Era un oasis de paz por el que pagaría si pudiera. ¿Quizá fuera eso lo que las flores azules ofrecían a los hongos a cambio de su sustento nutricional? Un refugio frente a la tormenta.

No reivindico la validez fáctica de dichas visiones. Son, en el mejor de los casos, verosímiles, y en el peor, un delirante disparate. Ni tan siquiera erróneas. Bien que mal, aprendí una lección valiosa. La manera en la que me había ido acostumbrando a pensar en los hongos traía consigo 'interacciones' abstractas entre organismos que, en realidad, parecían los diagramas que los maestros de escuela dibujaban en la pizarra: entes semiautomáticos que se comportaban según la lógica de una Game Boy de principios de la década de 1990. Sin embargo, el LSD me obligó a admitir que tenía imaginación y ahora veía a los hongos de otra manera. Quería entenderlos y no reducirlos a mecanismos de marcas, giros y pitidos, como siempre hacíamos. Más bien quería dejar que estos organismos me sacaran de mis oxidados patrones de pensamiento, imaginar las

posibilidades a las que se enfrentan, dejarles que me empujaran contra los límites de mi entendimiento, darme permiso para dejarme sorprender –y confundir– por sus vidas enmarañadas.

Los hongos habitan en mundos enredados; innumerables hilos atraviesan estos laberintos. He seguido todos los que he podido, pero hay grietas por las no me he podido meter por mucho que lo intentara. Pese a estar tan cerca, los hongos son desconcertantes, sus posibilidades son muy *otras*. ¿Debería esto ahuyentarnos? ¿Es posible que el ser humano, con su cerebro y cuerpo animal, con su lenguaje, aprenda a entender semejantes organismos tan distintos? ¿Cómo nos cambiaría el proceso? Siendo optimista, he pensado en este libro como un retrato de esta rama desatendida del árbol de la vida, pero es más complicado que eso. Es un relato de mi viaje hacia la comprensión de las vidas de los hongos pero también de la huella que estos han dejado en mí y en quienes he conocido por el camino, seres humanos y demás. «¿Qué voy a hacer con la noche y el día, con esta vida y esta muerte?», escribe el poeta Robert Brinhurst; «Cada paso, cada exhalación ruedan como un huevo hacia el filo de esta cuestión». Los hongos nos hacen rodar hacia el filo de muchas cuestiones. Este libro es el fruto de mi experiencia intentando dilucidar algunos de estos filos. Mi exploración me ha obligado a reconsiderar casi todo lo que sabía. Evolución, ecosistemas, individualidad, inteligencia, vida –ninguna es como creía que eran–. Espero que este libro flexibilice algunas de tus convicciones, tal y como los hongos han flexibilizado las mías.



**Seta grabada con esporas.**

1

## UN SEÑUELO

*¿Quién chulea a quién?*

**PRINCE**

Un montón de trufas blancas del Piamonte, *Tuber magnatum*, reposaba en las balanzas sobre un paño a cuadros. Presentaban un aspecto descuidado, como piedras lavadas; irregulares, como patatas; con cavidades, como las calaveras. Su peso rondaba los 2 kg: 12 000 €. Su dulce aroma invadía la estancia, y en su fragancia residía su valor. Era inconfundible y no se parecía a nada más: un señuelo, lo suficiente denso y desconcertante para perderse en él.

Estábamos a principios de noviembre, en plena temporada de trufas, y había ido a Italia para acompañar a dos cazadores de trufas en su búsqueda por las colinas aledañas a Bolonia. Tuve suerte. El amigo de un amigo conocía a un hombre que comerciaba con trufas. Y el comerciante en cuestión había conseguido que pudiera acompañar a dos de sus mejores truferos que, a su vez, habían consentido acompañarle. Los cazadores de trufa blanca tienen fama de ser reservados. Este tipo de trufa nunca ha sido domesticada y solo se puede encontrar en estado natural.

Las trufas son los cuerpos fructíferos subterráneos de varios tipos de hongos micorrícicos. Durante buena parte del año, los hongos de la trufa solo existen como redes de micelio, que subsisten gracias a los nutrientes que obtienen del suelo y a los azúcares que extraen de las raíces de las plantas. Sin embargo, su hábitat subterráneo les plantea un problema básico: las trufas son órganos que producen esporas, análogos a la fruta que produce semillas en una planta. Las esporas evolucionaron para que los hongos pudieran dispersarse pero, bajo tierra, estas esporas no pueden ser atrapadas por las corrientes de aire ni vistas por los animales.[1]

Su solución es desprender olor. Pero oler por encima del festival olfativo de un bosque no es moco de pavo. En los bosques se mezclan los olores, cada uno con un interés o distracción potencial para el hocico de un animal. Las trufas deben ser lo bastante acres para que sus aromas atraviesen las capas de suelo y entren en el aire, lo bastante peculiares para que un animal las distinga en medio del olor ambiental, y lo bastante deliciosas para que los animales las busquen, escarben y se las coman. Todas las desventajas visuales de las trufas –estar sepultadas bajo tierra, difíciles de ver cuando se desentierran y visualmente poco atractivas– quedan compensadas por el aroma.

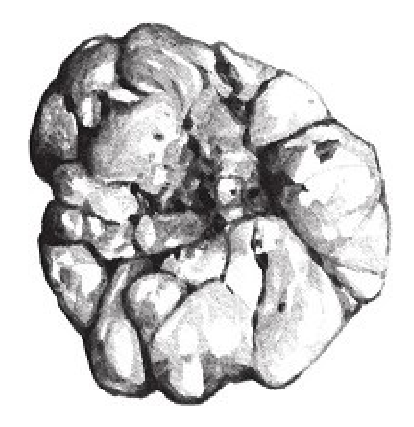
La trufa cumple con su función cuando es comida: se ha atraído al animal para que olisqueara el suelo y ha sido reclutado para que transporte las esporas del hongo en sus heces y las deposite en otro lugar. La fascinación de una trufa es, por consiguiente, el resultado de cientos de miles de años de entrelazamiento evolutivo con los gustos animales. La selección natural favorecerá a las trufas que encajen con las preferencias de sus mejores dispersores de esporas. Las trufas con mejor ‘química’ atraerán a animales con más éxito que aquellas con peor química. Como las orquídeas que imitan la forma y olor de una abeja hembra sexualmente receptiva, estos hongos proporcionan una descripción de los gustos animales –un retrato aromático evolutivo de la fascinación animal.

Estaba en Italia porque quería que un hongo me llevara a su mundo químico subterráneo. No estamos preparados para participar en las vidas químicas de los hongos, pero las trufas acres hablan un idioma tan penetrante y simple que hasta nosotros podemos entender. Al hacerlo, estos hongos nos incluyen en un momento de su ecología química. ¿De qué manera deberíamos pensar sobre los torrentes de interacción que se producen entre organismos bajo tierra? ¿Cómo deberíamos entender estas esferas de comunicación ajenas a la humana? Quizá corriendo tras un perro que sigue la pista de una trufa y enterrando mi cara en el suelo fue lo más cerca que pude estar de la tracción y promesas químicas que utilizan los hongos para dirigir tantos aspectos de sus vidas.

El olfato humano es extraordinario. Nuestros ojos pueden distinguir varios millones de colores, nuestros oídos pueden percibir medio millón de tonos, pero nuestra nariz puede apreciar más de un billón de olores diferentes. Los seres humanos podemos detectar prácticamente todas las sustancias químicas volátiles examinadas hasta la fecha. Somos capaces de superar a roedores y perros en

detectar determinados aromas y podemos seguirles la trayectoria. Los olores están presentes en los compañeros sexuales que escogemos y en nuestra capacidad para detectar miedo, ansiedad y agresión en otros. Y el olor permanece cosido al tejido de nuestros recuerdos; es habitual que la gente que sufre de trastorno de estrés postraumático tenga *flashbacks* olfativos.[2]

La nariz es un instrumento exquisitamente afinado. Su sentido olfativo es capaz de separar mezclas complejas en sus compuestos químicos de la misma manera que un prisma puede descomponer la luz blanca en sus colores constitutivos. Para hacerlo, debe detectar la disposición precisa de átomos dentro de una molécula. La mostaza huele a mostaza por los vínculos entre nitrógeno, carbono y azufre. El pescado huele a pescado por los lazos entre nitrógeno e hidrógeno. Los vínculos entre carbono y nitrógeno huelen a metal y petróleo.[3]



**Trufa blanca del Piamonte, *Tuber magnatum.***

La capacidad para detectar y reaccionar a sustancias químicas es una capacidad sensorial fundamental. La mayoría de organismos utiliza sus sentidos químicos para explorar y entender su entorno. Las plantas, hongos y animales emplean receptores similares para detectar sustancias químicas. Cuando las moléculas se adhieren a estos receptores, desencadenan una cascada de señales: una molécula desencadena un cambio celular, que desata un cambio mayor, y así sucesivamente. De esta manera, una causa, por pequeña que sea, puede propagar efectos mayores: la nariz humana puede detectar concentraciones muy bajas, de hasta 34000 moléculas en 1 $cm^2$, el equivalente a una sola gota de agua en 20 000 piscinas olímpicas.[4]

Para que un animal perciba un olor, una molécula debe depositarse en su epitelio olfativo. En los seres humanos, es una membrana en la parte superior de la cavidad nasal. La molécula se adhiere a un receptor, y los nervios se activan. El cerebro se implica mientras identifica las sustancias químicas, o desata pensamientos y respuestas emocionales. Los hongos están equipados con otro tipo de órganos. No tienen nariz ni cerebro y toda su superficie se comporta como un epitelio olfativo. Una red de micelios es una gran membrana con sensibilidad a las sustancias químicas: una molécula puede adherirse a un receptor en cualquier parte de su superficie y desencadenar una cascada de señales que altera el comportamiento de los hongos.

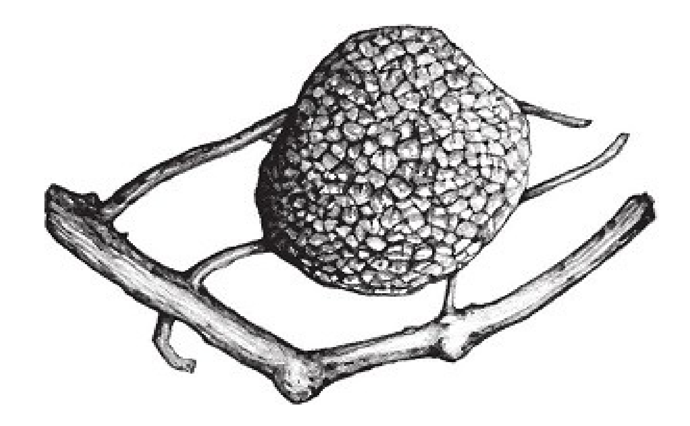
Los hongos viven inmersos en un campo nutrido de información química. Las trufas usan las sustancias químicas para avisar a los animales de que ya están listas para ser ingeridas; también las utilizan para comunicarse con las plantas, los animales y otros hongos –y consigo mismas–. No es posible entender los hongos sin explorar estos mundos sensoriales aunque nos sea difícil interpretarlos. Aunque quizá no importe, pues nosotros, como los hongos, nos pasamos casi toda nuestra vida atraídos por cosas. Sabemos qué significa ser atraídos o rechazados. Además, a través del olor, podemos participar en la conversación molecular que emplean para gestionar gran parte de su existencia.

*

En la historia de la humanidad, las trufas hace mucho tiempo que se han asociado con el sexo. La palabra «trufa», en muchos idiomas, se traduce como «testículo», o como «turmas de tierra» en castellano antiguo. Las trufas han evolucionado para embelesar a los animales porque sus vidas dependen de ello. Mientras hablaba con Charles Lefevre, un científico y productor de trufas en Oregón, sobre su trabajo con la trufa blanca de Périgord, me soltó: «Es divertido; mientras hablo contigo, me estoy “dando un baño” de aroma virtual de la *Tuber melanosporum*. Es como si una nube de su fragancia hubiera ocupado mi oficina, pero aquí, ahora mismo, no hay trufas. Según mi experiencia, estos *flashbacks* olfativos son habituales con las trufas, y hasta pueden incluir recuerdos visuales y emocionales».[5]

En Francia, san Antonio –el santo patrón de los objetos perdidos– es también el patrón de las trufas, y se celebran misas de la trufa en su honor. Los devotos poco pueden hacer por impedir la picaresca. Se tratan trufas baratas con

colorante o potenciadores del sabor para venderlas como caras. Los valiosos bosques de trufas son el objetivo de los cazadores furtivos de trufas. Se roban perros truferos especialmente entrenados que cuestan miles de euros. Se desperdiga carne envenenada por los bosques para matar a los sabuesos de la competencia. En el 2010, el truficultor francés Laurent Rambaud mató a tiros a un ladrón de trufas que se coló en su huerto de trufas mientras hacía la ronda nocturna. Tras su arresto, 250 defensores se manifestaron para apoyar el derecho de Rambaud a defender su propiedad, hartos del aumento de robos de trufas y de perros truferos. El subdirector del sindicado de productores de trufas de Tricastin explicó en el periódico *La Provence* que había aconsejado a sus colegas que nunca patrullaran sus campos con un arma porque «la tentación es demasiado alta». Lefrevre lo dejó claro: «Las trufas sacan el lado oscuro de las personas. Es como dinero depositado en el suelo, pero es perecedero y volátil».[6]



**Trufa negra de Périgord, *Tuber melanosporum.***

Las trufas no son los únicos hongos que atraen la atención de los animales. En la costa oeste de América del Norte, los osos derriban troncos y escarban zanjas para buscar los codiciados *matsutake*. Los cazadores de setas de Oregón han informado de alces con el hocico ensangrentado causado por su afán de buscar *matsutake* en ásperos suelos de piedra pómez. Algunas especies de orquídeas del bosque lluvioso tropical han desarrollado la facultad de imitar el olor, forma y color de las setas para atraer a las moscas amantes de las setas. Aunque las setas y otros cuerpos fructíferos son la parte visible de los hongos, el micelio también puede ser un señuelo. Un amigo que estudia insectos tropicales me mostró un vídeo con abejas de las orquídeas hacinándose alrededor de un orificio de un tronco en descomposición. Las abejas macho de las orquídeas

recolectan aromas por doquier para crear un cóctel que utilizan a la hora de cortejar a las hembras. Son perfumistas. El apareamiento dura segundos pero dedican toda su vida adulta a recolectar y mezclar sus fragancias. Sin haber podido demostrar aún su hipótesis, mi amigo estaba convencidísimo de que las abejas cultivaban compuestos fúngicos para añadir a sus buqués. De hecho, las abejas de las orquídeas tienen fama de tener buen gusto por los compuestos químicos aromáticos, muchos de ellos producidos por hongos que descomponen la madera.[7]

Los seres humanos llevamos perfumes producidos por otros organismos y no es raro que incorporemos aromas fúngicos a nuestros propios rituales sexuales. La madera de agar, u *oudh*, es una infección de hongos en los árboles *Aquilaria* que se encuentran en la India y el sureste asiático y uno de los materiales puros más valiosos del mundo. Se utiliza para hacer una fragancia –con notas leñosas, a frutos secos húmedos, a miel oscura– que ha sido codiciada, al menos, desde la época del médico Dioscórides de la Antigua Grecia. El gramo del mejor *oudh* cuesta más que el oro o el platino –100 000 US$ el kilo– y la cosecha destructiva de árboles de *Aquilaria* en estado natural los ha llevado casi a la extinción.[8]

Théophile de Bordeu, médico francés del siglo XVIII, afirmó que cada organismo «no deja de despedir exhalaciones, un olor, emanaciones sobre su cuerpo… Estas emanaciones han conformado su estilo y comportamiento y son, en realidad, partes genuinas de sí mismo». La fragancia de una trufa y el perfume de una abeja de las orquídeas pueden circular más allá de la carne de cada organismo, pero estos campos de olor constituyen una parte de sus cuerpos químicos que se superponen entre sí como fantasmas en una discoteca.[9]

Me pasé unos minutos en la sala de pesaje de trufas, absorto entre fragancias. Mi ensoñación quedó interrumpida por mi anfitrión Tony, comerciante de trufas, que entró afanosamente con uno de sus clientes. Cerró la puerta tras él para evitar que escapara el olor. El cliente inspeccionó la pila de trufas de las balanzas y echó un vistazo a los cuencos con especímenes sin clasificar y sin limpiar dispersos sobre una mugrienta mesa de trabajo. Asintió con la cabeza a Tony, que ató las esquinas del paño. Salieron al jardín, se dieron la mano y el cliente se marchó en su elegante automóvil negro.

Había sido un verano seco y la recolecta de trufas había sido pobre, y eso quedaba reflejado en los precios. De comprárselas directamente a Tony, 1 kg costaría unos 2000 €. El mismo kilo en un mercado o restaurante podría costar 6000 €. En el 2007, una sola trufa de 1,5 kg se vendió en subasta por 165 000 £ –como los diamantes, el precio de las trufas aumenta no de manera lineal a su tamaño.[10]

Tony era educado pero tenía el punto fanfarrón de los hombres de negocios. Parecía sorprendido que yo quisiera acompañar a sus cazadores y no quería que me hiciera demasiadas ilusiones. «Claro que puedes ir con mis chicos, pero probablemente no encontréis nada. Y cuesta trabajo. Subirás y bajarás. Entre arbustos. Por el barro. Vadearás arroyos. ¿Son los únicos zapatos que tienes?» Le aseguré que no me importaba.

Los cazadores de trufas tienen su territorio, unas veces legal, y otras, no. Cuando llegué, Daniele y Paride, los dos cazadores de trufas, se estaban vistiendo con ropa de camuflaje. Les pregunté si les ayudaría a acercarse con sigilo a las trufas, y me respondieron sinceramente. Les permitía salir sin que les siguieran otros cazadores de trufas. Su tarea consiste en saber dónde buscar. Su conocimiento tiene valor y, como las trufas, puede ser robado.

Paride era el más simpático y salió a recibirme con *Kika*, su perra trufera favorita. Tenía cinco perros, de diferentes edades y nivel de entrenamiento, unos especializados en trufas negras y otros en blancas. *Kika* era un amor, y Paride me la presentó con orgullo: «Mi perra es muy lista pero yo lo soy más». La raza de *Kika* –la Lagotto Romagnolo– es una de las más socorridas para salir a buscar trufas. Me llegaba a la rodilla y me recordaba a una trufa con esos tirabuzones desgreñados sobre los ojos. Es más, después de pasarme toda la mañana oliendo trufas, conociendo cachorritos de perros truferos, hablando de trufas, asistiendo a ventas de trufas y comiendo trufas, hasta las rocosas colinas ondulantes ya habían empezado a parecerme trufas. Paride me habló de las sutiles señales que él y *Kika* empleaban para comunicarse entre sí. Habían aprendido a leer e interpretar hasta el más mínimo cambio en el comportamiento del otro y podían coordinar sus movimientos casi en silencio absoluto. Las trufas habían desarrollado la facultad de comunicar su disposición a ser comidas a los animales. Los seres humanos y los perros habían desarrollado formas para transmitirse las insinuaciones químicas de las trufas.

El aroma de una trufa es un atributo complejo y parece brotar de las relaciones que la trufa establece con su comunidad de microbios, y del suelo y

clima en el que habita –su *terroir*–. Los cuerpos fructíferos de la trufa albergan prósperas comunidades de bacterias y hongos levaduriformes –entre un millón y mil millones de bacterias por gramo de peso seco–. Muchos organismos de los microbiomas de las trufas pueden producir los característicos complejos volátiles que participan en los aromas de las trufas, y probablemente el cóctel de sustancias químicas que llega a nuestra nariz es obra de más de un solo organismo.[11]

La base química de la seducción de las trufas sigue sin conocerse. En 1981, un estudio publicado por investigadores alemanes descubría que las trufas blancas del Piamonte *(Tuber magnatum)* y las trufas negras de Périgord *(Tuber melanosporum)* desprendían androsterol, un esteroide de fragancia almizcleña, en cantidades nada desdeñables. En los cerdos, el androsterol funciona como una hormona sexual. Lo producen los machos y hace que las cerdas se coloquen en posición de monta. Este descubrimiento desencadenó la especulación de que el androstenol podría explicar las impresionantes aptitudes de las cerdas para encontrar trufas a gran profundidad en el suelo, pero un estudio publicado nueve años después puso en duda dicha posibilidad. Los investigadores enterraron trufas negras, un sintético con sabor a trufa y androstenol, a 5 cm de profundidad, y pusieron a prueba a un cerdo y a cinco perros, incluido el campeón del concurso de perros truferos del condado. Todos los animales detectaron las trufas reales y el sintético con sabor a trufa, pero ninguno halló el androstenol.[12]

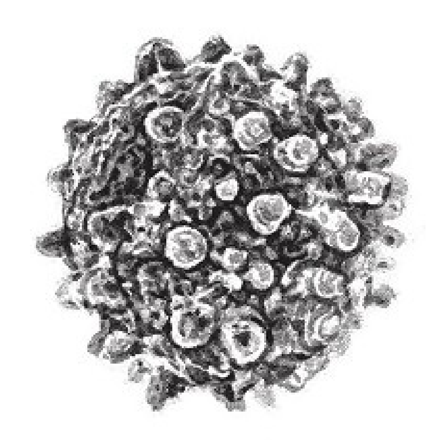
En una nueva tanda de pruebas, los científicos restringieron la seducción de las trufas a una sola molécula, el sulfuro de dimetilo. Fue un estudio meticuloso pero era improbable que desvelara toda la verdad. El olor de una trufa está formado por multitud de moléculas diferentes en movimiento –más de un centenar en trufas blancas, y unas cincuenta en las otras especies más populares–. Estos elaborados buqués requieren de mucha energía y es improbable que hayan evolucionado a menos que tengan una finalidad. Y aún hay más, los animales tienen gustos diferentes. Desde luego, no todas las especies de trufas son atractivas para los seres humanos y algunas son incluso ligeramente venenosas. De las más de mil especies de trufas que hay en América del Norte, solo algunas, muy pocas, tienen interés culinario. Y ni siquiera estas interesan a todo el mundo. Tal y como me explicó Lefevre, a mucha gente le molesta el aroma de especies que son, por otro lado, muy valiosas. El olor de algunas especies es repulsivo. Me contó el caso de la *Gautieria*, un género que

produce trufas con una pestilencia vomitiva –como a gas de cloaca o diarrea de bebé–. A sus perros les encanta, pero su mujer no deja que entre con ellas en casa, ni siquiera para fines taxonómicos.[13]

Sin embargo, las trufas se envuelven de capas de atracción: los seres humanos entrenan perros para encontrar trufas porque los cerdos se sienten tan atraídos por ellas que se las comen. Los restauradores de Nueva York y Tokio viajan a Italia para consolidar vínculos con comerciantes de trufas. Los exportadores han conseguido crear sofisticados sistemas de empaquetado para conservar las trufas en condiciones óptimas en los que se lavan, empaquetan, entregan en el aeropuerto, cruzan el planeta en avión, se recogen en otro aeropuerto, atraviesan aduanas, se vuelven a empaquetar y se distribuyen a los consumidores, todo en 48 horas. Las trufas, y las setas *matsutake*, deben llegar frescas al plato a los dos o tres días de su recogida. Los aromas de trufas se forman en un proceso activo de células vivas y metabolizantes. El olor de una trufa aumenta cuando sus esporas se desarrollan y su aroma cesa cuando sus células mueren. A diferencia de algunos tipos de setas, las trufas no se pueden probar una vez secas. Son químicamente locuaces, incluso vociferantes. Párese el metabolismo y se va a parar su olor. Por esta razón, en muchos restaurantes se ralla la trufa fresca sobre el plato delante del comensal. Hay pocos organismos tan ricos en persuadir a los seres humanos que se exporten con tamaña urgencia.[14]

Nos apretujamos en el coche de Paride y llegamos a un valle por una estrecha carretera comarcal, entre los robledos amarillos y pardos que tapizaban las colinas. Paride hablaba del tiempo y bromeaba sobre el entrenamiento de perros y los pros y los contras de trabajar con un ‘bandido’ como Daniele. Al rato, torcimos por una pista de tierra y nos detuvimos. *Kika* salió del maletero de un salto, y caminamos por un prado hasta que nos adentramos en un bosque. Daniele ya había llegado, rondando clandestinamente con su perro. Nos contó que había otro cazador de trufas cerca y que debíamos guardar silencio. El perro de Daniele estaba desgreñado y descuidado, con ramitas enredadas en sus rizos. No tenía nombre, aunque Paride había oído a Daniele llamarlo *Diavolo* por la mañana. A diferencia de *Kika*, que era cariñosa, *Diavolo* tenía una tendencia a morder y a gruñir. Paride me explicó el por qué. Mientras él entrenaba a sus perros como si fuera un juego, Daniele los entrenaba matándolos de hambre.

«Fíjate», Paride señaló a *Diavolo*, «está desesperado, se está comiendo las bellotas». Charlaron un rato. Daniele le soltó que sus perros eran cazadores de trufas más eficaces que sus mimados y bien alimentados «animales domésticos», y Paride defendió la reformada escuela de entrenamiento de perros truferos, resumiéndolo de forma clara: «Daniele busca trufas de noche, y yo las busco de día. Él es una persona nerviosa y yo no. Su perro muerde, y el mío es cariñoso. Su perro está flaco, y el mío no. Él es malo, y yo soy bueno».



**Espora de trufa.**

Y de repente, *Diavolo* salió disparado. Lo seguimos, Paride comentaba la jugada mientras le perseguíamos a toda prisa. «Quizá es una trufa. O un ratón. Sea lo que sea, el perro está contento». Encontramos a *Diavolo* escarbando y olisqueando a media cuesta de una colina embarrada. Daniele lo alcanzó y apartó las zarzas. Llegados a este punto, me explicó Paride, el cazador de trufas tiene que saber leer el lenguaje corporal del perro. Un meneo de cola prometía trufas, una cola quieta sugería otra cosa. Si escarbaba con dos patas significaba trufas blancas, si lo hacía con una, trufas negras. Era buena señal, y Daniele empezó a despejar el suelo con una herramienta de punta roma, y mientras ahondaba en el suelo, olía cada centímetro de tierra. Él y su perro se turnaban, aunque él no quitaba el ojo a *Diavolo* por si escarbaba demasiado fuerte. Paride nos sonrió: «Un perro hambriento se come la trufa».

Y por fin, a 46 cm de la superficie, Daniele la encontró alojada en la tierra húmeda. Apartó el barro con sus dedos y un pequeño gancho de metal. El aroma de la trufa afloró, más intenso y saturado que en la sala de pesaje. Este era su hábitat natural, y su fragancia se fundió en orgánica armonía con la humedad del

suelo y el desflecado de las hojas enmohecidas. En ese momento me imaginé siendo lo bastante sensible para notar el aroma de la trufa a cierta distancia, y lo bastante comprometido para dejarlo todo y perseguirlo. Al inspirar sus efluvios me acordé del pasaje de *Un mundo feliz* de Aldous Huxley donde describe el concierto de un órgano de fragancias, un instrumento capaz de dar recitales olfativos de la misma manera que lo haría un instrumento musical. Es un concepto fácilmente modificado por las trufas –órganos de aromas en otro sentido– que ejecutan, a su manera, *suites* de compuestos volátiles.

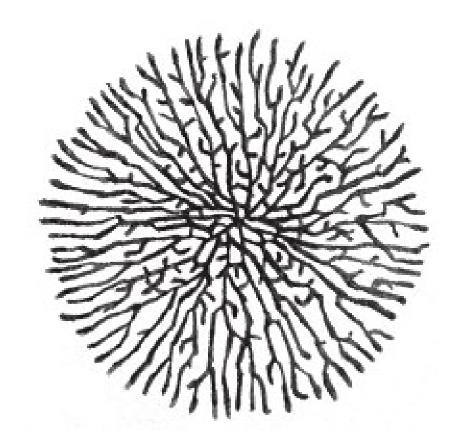
Había funcionado de maravilla. Aquí estábamos todos, despeinados y manchados de barro, de pie alrededor de una trufa. Había desencadenado una cascada de señales que había atraído a una *troupe* de animales: primero a un perro, después a un cazador de trufas, y luego a sus acompañantes más lentos. Cuando Daniele sacó la trufa, se hundió la tierra que la rodeaba. «¡Mira!», Paride apartó la tierra. «La casa de un ratón». No habíamos sido los primeros en llegar.

Cuando percibimos el aroma de una trufa, la emisión es unilateral, de la trufa al mundo. Comparativamente, el proceso es sin matices. Para atraer a un animal, el aroma tiene que ser curioso, y obviamente delicioso. Pero por encima de todo tiene que ser penetrante y fuerte. En realidad, no importa si sus esporas las disemina un jabalí o una ardilla voladora, entonces ¿para qué ser quisquilloso? La mayoría de animales hambrientos irá tras un aroma irresistible. Además, una trufa no cambia su aroma en función de quien le preste atención. Puede excitar pero no es excitable. Su señal se propaga alto y claro y, una vez ha empezado, nunca se apaga. Una trufa madura emite un inequívoco llamamiento químico en lengua franca, una fragancia de gusto masivo capaz de provocar que Daniele, Paride, dos perros, un ratón y un servidor converjan bajo un mismo zarzal de una ladera embarrada de Italia.

Las trufas –como muchos otros valiosos cuerpos fructíferos de los hongos– son los canales de comunicación menos sofisticados de dichos hongos. Buena parte de la vida de los hongos, incluido el desarrollo del micelio, depende de formas de seducción más sutiles. Hay dos pasos clave que dan las hifas de los hongos para convertirse en una red de micelio. Primero, se ramifican. Segundo, se fusionan. (El proceso por el que las hifas se unen entre sí se llama «anastomosis», que en griego significa «poner por la boca».) Si las hifas no

pudieran ramificarse, una hifa nunca podría multiplicarse. Si estas no pudieran fusionarse entre sí, no podrían transformarse en redes complejas. Sin embargo, antes de unirse, las hifas deben encontrar otras hifas y atraerse, un fenómeno conocido como «autopersecución». La fusión entre hifas es la puntada de unión que hace que el micelio sea micelio, la acción más básica del tejido de una red. En este sentido, el micelio de cualquier hongo surge a partir de su capacidad para atraerse a sí mismo.[15]

Sin embargo, de igual modo que una determinada red de micelio es capaz de encontrarse a sí misma, también tiene la capacidad de hallar a otra. ¿De qué manera los hongos conservan una sensación de cuerpo sujeto a una revisión constante? Las hifas deben ser capaces de percibir si topan con una ramificación de sí mismas, o con otro hongo. Si topan con otro, deben ser capaces de percibir si es una especie diferente –potencialmente hostil– o un miembro de sí mismo sexualmente compatible, o ninguno. Algunos hongos tienen decenas de miles de identidades sexuales –tipos de compatibilidad sexual–, aproximadamente el equivalente a nuestros sexos (el récord lo posee el esquizófilo común, *Schizophyllum commune*, que tiene más de 23 000 identidades sexuales, cada una sexualmente compatible con prácticamente todas las otras). El micelio de muchos hongos puede fusionarse con otras redes de micelio si son bastante similares genéticamente, aunque no sean sexualmente compatibles. La identidad de los hongos importa pero no siempre es un mundo binario. El uno mismo puede ir ensombreciendo poco a poco a la otredad.[16]



**Micelio que crece hacia fuera a partir de una espora.**
**Redibujado desde Buller (1931).**

La seducción es la base de muchos tipos de sexo fúngico, que incluye a los hongos de la trufa. Las trufas *per se* son el resultado de un encuentro sexual: para que un hongo de la trufa como el *Tuber melanosporum* dé fruto, las hifas de una red de micelios deben fusionarse con las de una red distinta pero sexualmente compatible, y compartir material genético. Durante buena parte de sus vidas, como redes de micelios, los hongos de la trufa viven como identidades sexuales independientes, ya sean «–» o «+» (según los parámetros de los hongos, sus vidas sexuales están claras). El sexo ocurre cuando una hifa «–» atrae y se fusiona con una hifa «+». Un individuo desempeña un papel paternal al aportar solo material genético. El otro juega un papel maternal al aportar material genético y crear la carne que madurará en trufas y esporas. Las trufas se distinguen de los seres humanos en que las identidades sexuales «+» y «–» pueden ser maternales o paternales; es como si todos los seres humanos fueran macho y hembra a la vez y fueran igual de capaces de desempeñar el papel de madre o padre, siempre y cuando podamos tener sexo con un individuo de identidad sexual opuesta. Aún se desconoce cómo se produce la atracción sexual entre hongos de la trufa. Los hongos estrechamente relacionados utilizan feromonas para atraer parejas, y los investigadores tienen la fuerte sospecha de que las trufas también usan feromonas sexuales para tal fin.[17]

Sin ‘autopersecución’ no habría micelio. Sin micelio, no podría haber atracción entre identidades sexuales «–» y «+». Sin atracción sexual no habría sexo. Y sin sexo no hay trufa. Sin embargo, las relaciones entre los hongos de la trufa y sus árboles asociados son igual de importantes, y sus interacciones químicas deben estar gestionadas cuidadosamente. Las hifas de los hongos jóvenes de la trufa morirán pronto a menos que encuentren una planta a la que asociarse. Las plantas deben dejar entrar en sus raíces a las especies de hongos que establezcan una relación mutuamente beneficiosa, y no una que las pueda dañar (hay muchas). Las hifas de los hongos y las raíces de las plantas se enfrentan al desafío de encontrarse unas con otras en medio del entusiasmo químico que reina bajo tierra, donde innumerables raíces, hongos y microbios se desenvuelven y se engranan.[18]

He aquí otro episodio de atracción y seducción, de llamada química y de respuesta. La planta y el hongo se valen de sustancias químicas volátiles para atraerse entre sí, de la misma manera que las trufas cautivan a los animales en el bosque. Las receptivas raíces de las plantas producen hilos de compuestos volátiles que transitan por el suelo y fabrican esporas para germinar e hifas para

ramificarse y crecer más rápido. Los hongos producen hormonas para el crecimiento de la planta que manipulan las raíces, haciendo que proliferen las ramas plumíferas –a mayor zona superficial, mayores probabilidades hay de encuentro entre las cofias de las raíces y las hifas de los hongos–. (Muchos hongos producen hormonas vegetales y animales que alteran la fisiología de sus asociados.)[19]

Ha de cambiar algo más que la arquitectura de las raíces para que un hongo se adhiera a una planta. Como respuesta a los perfiles químicos característicos de cada uno, las cascadas de señales se propagan por las células de la planta y los hongos, activando una serie de genes. Ambos reorientan sus metabolismos y sus programas de desarrollo. Los hongos liberan sustancias químicas que suspenden las respuestas inmunológicas de sus plantas asociadas, sin las cuales no pueden acercarse lo bastante para formar estructuras simbióticas. Una vez establecidas, siguen apareciendo colaboraciones micorrícicas. Las conexiones entre hifas y raíces son dinámicas, formadas y reconstituidas a medida que las cofias de las raíces y las hifas de los hongos envejecen y mueren. Estas son relaciones que incesantemente se remodelan a sí mismas. Si uno pudiera colocar su epitelio olfativo en el suelo, sería como asistir al concierto de una banda de *jazz*, con los músicos escuchando, improvisando, contestándose entre sí a tiempo real.[20]

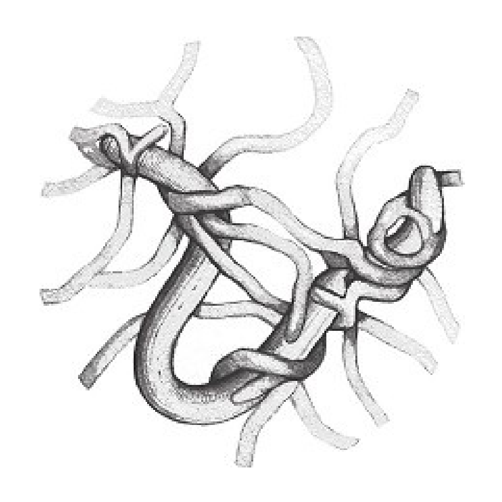
Las trufas blancas del Piamonte y otros codiciados hongos micorrícicos, como los hongos blancos, los rebozuelos y los *matsutake*, nunca han sido domesticados, en parte por la variabilidad de sus relaciones con las plantas y en parte por las complejidades de sus vidas sexuales. Nos faltan demasiados datos para entender cómo se comunican los hongos entre sí. Aunque se pueden cultivar algunas especies de trufas, como la negra de Périgord, la truficultura está en una fase embrionaria si se la compara con el venerable arte que rodea a la mayoría de esfuerzos agrícolas practicados por los seres humanos, e incluso el éxito de los agricultores estacionales puede variar mucho. En la New World Truffieres de Charles Lefevre, la proporción de plantas de semilleros que crecen con éxito con el micelio de la trufa negra de Périgord ronda el 30%. Un año, sin haber cambiado deliberadamente el método, consiguió el 100% del éxito. «¡Soy incapaz de reproducir ese resultado!», me comentó. «No tengo ni idea de lo que hice bien.»

Para cultivar trufas con eficacia, hay que entender las particularidades y necesidades no solo de los hongos –con sus idiosincrásicos sistemas de reproducción–, sino también de los árboles y bacterias con los que conviven.

Además, se debe comprender la importancia de las variaciones sutiles que se producen en el suelo, estación y clima que los rodea. «Es un campo intelectualmente estimulante porque es muy interdisciplinar», me comentó Ulf Büntgen, un profesor de geografía en Cambridge, y el primero en informar sobre la fructificación de una trufa negra de Périgord en las islas Británicas. «Es microbiología, fisiología, gestión de tierras, agricultura, silvicultura, ecología, economía y cambio climático. Hay que tomar una perspectiva holística, no queda otra.» Los asuntos de las trufas rápidamente se despliegan en ecosistemas enteros, y los científicos aún no consiguen comprenderlo.[21]

Para algunos, atraídos por la seducción química de los hongos, el resultado es más sencillo: la muerte.

Entre las proezas sensoriales más impresionantes están las que ejecutan los hongos depredadores que atrapan e ingieren gusanos nematodos. En todo el mundo se pueden encontrar cientos de especies de hongos nematófagos. La mayoría se pasan toda la vida descomponiendo materia orgánica, y solo empiezan a cazar cuando la materia orgánica escasea. Pero son depredadores sutiles: a diferencia de las trufas, cuyo aroma, una vez ha empezado, siempre permanece, los hongos nematófagos solo producen órganos para cazar gusanos y emiten una llamada química cuando notan a los nematodos cerca. Si hay mucho material orgánico en descomposición, ni se molestan, aunque esté infestado de gusanos. Para comportarse así, los hongos nematófagos deben tener una sensibilidad exquisita para detectar la presencia de gusanos. Todos los nematodos dependen del mismo tipo de molécula para atender a varios fines, desde regular su desarrollo a atraer parejas. A cambio, los hongos utilizan estas sustancias químicas para espiar a sus presas.[22]



**Gusano nematodo siendo devorado.**

Los métodos utilizados por los hongos para cazar nematodos son horripilantes y diversos. Es un hábito que ha evolucionado un gran número de veces –muchos linajes de hongos han llegado a una conclusión similar pero de diferentes maneras–. Algunos hongos desarrollan redes adhesivas, o ramas a las que los nematodos se quedan pegados. Los hay que utilizan medios mecánicos, como desarrollar trampas hifales que se hinchan al mínimo contacto con la presa, atrapándola. Algunos, como la habitualmente cultivada seta ostra, *Pleurotus ostreatus*, producen tallos de hifas mojados por una sola gotita tóxica que paraliza a los nematodos, dando a la hifa el tiempo suficiente para crecer a través de sus bocas y digerir el gusano desde dentro. Otros producen esporas que pueden nadar por el suelo, con sustancias químicas que atraen a los nematodos, a los que se adhieren. Una vez adherido, las esporas brotan y el hongo arponea el gusano con hifas conocidas como «células cañón».[23]

La caza fúngica de gusanos tiene un comportamiento variable: diferentes individuos de una especie determinada pueden responder de forma idiosincrásica, produciendo diferentes tipos de trampa, o colocando trampas de maneras peculiares. La especie *Arthrobotrys oligospora* se comporta como un descomponedor ‘normal’ cuando hay mucho material orgánico y, si hace falta, crea trampas para nematodos en su micelio. También puede enroscarse en el micelio de otros tipos de hongos, para matarlos de hambre, o desarrollar estructuras especiales para penetrar y alimentarse de las raíces de las plantas. Qué es lo que le hace escoger entre una u otra opción sigue siendo una incógnita.[24]

¿Cómo deberíamos hablar de la comunicación de los hongos? En Italia, cuando nos amontonamos alrededor del agujero en la ladera embarrada, intenté imaginarme la escena desde el punto de vista de la trufa. Con la emoción, Paride nos ofreció una interpretación poética. «La trufa y su árbol son como amantes, o como marido y mujer», canturreó. Y añadió: «Si los hilos se rompen, no hay vuelta atrás. El vínculo desaparece para siempre. La trufa nació de la raíz de un árbol, protegida por la rosa silvestre». Hizo un ademán encarado a las zarzas. «Reside en su interior, protegida por los espinos cual Bella Durmiente que espera ser besada por el perro.»

El punto de vista científico predominante apunta que es un error imaginar que hay algo intencionado en la mayoría de interacciones no humanas. Los hongos de la trufa no expresan. No hablan. Como pasa con muchos animales y plantas de los que dependen, los hongos de la trufa reaccionan a su entorno de forma automática, basados en unos hábitos robóticos que aprovechan al máximo sus posibilidades de supervivencia. En un fuerte contraste está la alegre experiencia de la vida humana, donde la cantidad de un estímulo fluye sin interrupciones hasta la calidad de sensación; donde los estímulos se sienten y desatan emociones.

Sin perder el equilibrio en la ladera embarrada, coloqué mis fosas nasales sobre el intenso terrón de hongos. No importa lo mucho que me costó reducir la trufa a un automatismo, siguió cobrando vida en mi cabeza.

Cuando se intentan entender las interacciones de organismos no humanos, es fácil fluctuar entre estas dos perspectivas: la del comportamiento inanimado de robots pre-programados por un lado, y la de la rica y viva experiencia humana por el otro. Enmarcados como organismos sin cerebro, que carecen del sistema básico requerido para tener la más mínima ‘experiencia’, las interacciones entre hongos no son más que respuestas automáticas a una serie de detonantes bioquímicos. Sin embargo, el micelio de los hongos de la trufa, como el de la mayoría de especies de hongos, nota su entorno y reacciona a él de formas impredecibles. Sus hifas son químicamente irritables, sensibles, excitables. Es esta capacidad de interpretar las emisiones químicas de otros lo que permite a los hongos acordar una serie de complejas relaciones de intercambio con los árboles, extraer lentamente las reservas de nutrientes del suelo, practicar sexo, cazar, o ahuyentar a los agresores.

Se suele pensar en el antropomorfismo como en una ilusión que aparece como una burbuja en las blandas mentes humanas: sin preparación, sin

disciplina, sin dureza. Hay buenas razones para ello: al humanizar el mundo, nos curamos en salud para no entender las vidas de otros organismos en sus propios términos ¿Pero podría esta postura llevarnos a cosas que no tengamos en cuenta o incluso que olvidemos prestarles atención?[25]

La bióloga Robin Wall Kimmerer, miembro de la Citizen Potawatomi Nation de las Grandes Planicies de Estados Unidos, observa que el idioma de los patawatomi tiene muchas formas verbales que atribuyen vida al mundo no humano. La palabra que utilizan para «colina», por ejemplo, es un verbo: «ser una montaña». Las colinas siempre están formándose, están siendo montañas de forma activa. Provistos de esta «gramática de *animizar*», pueden hablar de la vida de otros organismos sin reducirlos a una cosa inanimada, o tomar prestados conceptos que tradicionalmente se reservan a los seres humanos. Por el contrario, en inglés, escribe Kimmerer, no hay forma de reconocer la «sencilla existencia de otro ser vivo». Si no eres un *sujeto* humano, por defecto pasas a ser un *objeto* inanimado: una «mera cosa». Si se toma un concepto humano y se readapta para poder entender la vida de un organismo no humano, se caerá en la trampa del antropomorfismo. Al utilizar el «ello», se cosifica el organismo y se cae en otro tipo de trampa diferente.[26]

Las realidades biológicas nunca son negras y blancas. ¿Por qué deberían ser así los relatos y metáforas que usamos para dar sentido al mundo –nuestras herramientas de investigación–? ¿Seremos capaces de ampliar algunos de nuestros conceptos, como que para hablar no siempre se necesita una boca, para oír quizá no siempre se precisen oídos y para interpretar no siempre se requiere de un sistema nervioso? ¿Somos capaces de hacerlo sin sofocar otras formas de vida con prejuicios y dobles sentidos?

Daniele envolvió la trufa y cuidadosamente llenó de tierra el agujero, recolocando la mata de zarzas sobre la tierra removida. Paride me explicó que era para no alterar la relación del hongo con las raíces de su árbol. Daniele dijo que era para impedir que otros cazadores de trufas siguieran nuestro rastro. Regresamos paseando por el campo. El aroma de la trufa había perdido intensidad para cuando llegamos al automóvil, y era incluso más débil cuando volvimos a la sala de pesaje. Me preguntaba qué aroma quedaría cuando se rallara sobre un plato en Los Ángeles.

*

Meses más tarde, en las colinas boscosas de las afueras de Eugene, Oregón, salí a buscar trufas con Charles Lefevre y *Dante*, su Lagotto Romagnolo. *Dante* es lo que Lefevre llama un perro de diversidad. Los perros de producción –como *Kika* y *Diavolo*– están entrenados para buscar especies concretas de trufas; en cambio, los perros de diversidad siguen la pista de cualquier cosa que huela interesante. Esto les permite encontrar especies de trufa que nunca han olido antes. Dicho esto, *Dante*, a veces, persigue cosas que no son trufas –por ejemplo, milpiés de olor acre–, aunque también ha desenterrado cuatro especies de trufa sin clasificar. Esto no es tan raro. Mike Castellano, un famoso experto en trufas que hasta tiene una especie que lleva su nombre –ha descrito dos nuevos órdenes, más de dos docenas de géneros nuevos y unas 200 especies nuevas de trufa–, informa de sus habituales descubrimientos de nuevas especies de trufa cuando las recoge en California, un recordatorio de cuánto nos queda por saber.

Mientras paseábamos entre abetos de Douglas y helechos de espada, Lefevre me explicó que los humanos han estado cultivando trufas sin saberlo durante siglos. Las trufas prosperan en los entornos alterados por seres humanos. En Europa, la producción de trufas se desplomó durante el siglo XX porque las tierras de los bosques gestionados donde crecen estos hongos fueron taladas para la agricultura o abandonadas a su suerte para que crecieran bosques maduros. Ninguna es óptima para la producción de trufas. Para Lefevre, el renacimiento de la truficultura es emocionante porque es una manera de sacar provecho comercial de un territorio boscoso y de invertir capital privado en la restauración del medio ambiente. Para cultivar trufas, hay que plantar árboles. Hay que aceptar que el suelo está lleno de vida. No se pueden cultivar trufas sin pensar a nivel de ecosistema.

*Dante* zigzagueaba, olfateando. Lefevre me explicó la teoría de que el maná –el alimento providencial que alimentó a los israelitas durante su travesía por el desierto– fue en realidad la trufa del desierto, una exquisitez que sale sin previo aviso del suelo árido de casi todo Oriente Medio. Me confesó sus intentos fallidos por cultivar la esquiva trufa blanca, y lo poco que comprendemos su relación con sus árboles huésped. Pensé en las muchas maneras que los hongos tienen de reaccionar ante los entornos cambiantes y para encontrar nuevas formas de vivir con las plantas y animales de los que dependen.[27]

De regreso en el bosque, mientras buscaba trufas, de nuevo intentaba encontrar un lenguaje para describir las vidas de estos organismos extraordinarios. Los perfumistas y catadores de vinos se valen de metáforas para

detallar con exactitud las diferencias entre aromas. Una sustancia química pasa a ser «hierba recién cortada», «mango sudoroso», o «pomelo y sudor de caballo». Sin estas referencias seríamos incapaces de imaginarlo. El cis-3-hexenol huele a hierba recién cortada. El oxane huele a mango sudoroso. El gardamide huele a pomelo y sudor de caballo. Esto no quiere decir que el oxane sea mango sudoroso, sino que si yo te pasara un vial abierto seguramente reconocerías el olor. Al establecer un vínculo entre lenguaje humano y fragancia, también le añadimos una opinión y un prejuicio. Nuestras descripciones pervierten y deforman los fenómenos que describimos pero, a veces, es la única forma que tenemos para hablar de las características del mundo: para decir cómo son pero sin serlo. ¿Ocurre lo mismo cuando hablamos de otros organismos?[28]

Reduciéndolo a la más mínima expresión no quedan muchas opciones. Quizá los hongos no tengan cerebro, pero sus muchas opciones implican decisiones. Sus volubles entornos conllevan improvisación. Sus juicios comportan errores. Ya sea en la respuesta de autopersecución de las hifas dentro de una red de micelios, en la atracción sexual entre dos hifas en redes separadas de micelios, en la fascinación necesaria entre una hifa micorrícica y una raíz de planta, o en la atracción fatal de un nematodo a una gotita fúngica tóxica, los hongos no paran de sentir e interpretar sus mundos, aunque nosotros no tengamos forma de saber *cómo* siente o interpreta una hifa. Quizá no sea tan descabellado pensar que los hongos se comunican entre sí con un vocabulario químico, organizado y reorganizado para que otros organismos lo puedan interpretar, sean estos nematodos, una raíz de árbol, un perro trufero o un restaurador de Nueva York. A veces –como pasa con las trufas– estas moléculas quizá se convierten en un idioma químico que nosotros, a nuestro modo, podemos comprender, aunque la inmensa mayoría siempre pasarán por encima de nuestras cabezas o por debajo de nuestros pies, sin enterarnos.

*Dante* empezó a escarbar frenéticamente. «Parece una trufa», dijo Lefevre al leer el lenguaje corporal del perro, «pero está honda». Le pregunté si alguna vez le preocupaba que *Dante* se hiciera daño en el hocico o las patas al escarbar con tanta intensidad. «Ah, sigue haciéndose daño en sus almohadillas», reconoció Lefevre, «le voy a tener que comprar unas botitas». *Dante* resopló y escarbó, pero no sirvió de nada. «Me siento fatal cuando no recompenso sus esfuerzos si no tiene éxito», Lefevre se agachó y despeinó sus rizos, «pero aún no he dado con ninguna chuche que le guste más que una trufa. No hay nada como las trufas». Me sonrió, y añadió: «Para *Dante*, Dios vive bajo tierra».

2

# LABERINTOS VIVOS

*Me siento tan feliz en la sedosa y húmeda oscuridad del laberinto y no hay hilo alguno.*

**HÉLÈNE CIXOUS**

Imagínate que pudieras atravesar dos puertas a la vez. Es inconcebible, ¿verdad? Pues los hongos lo hacen todo el rato. Cuando se encuentran con la bifurcación de un camino, las hifas de los hongos no tienen que escoger entre uno u otro. Pueden ramificarse y emprender los dos caminos.

Se puede seguir el rastro de las hifas con laberintos microscópicos para ver cómo husmean qué camino tomar. De estar obstaculizado, se ramifican. Los ápices hifales se desvían alrededor del obstáculo y después recuperan la dirección original de su crecimiento. Pronto encuentran el camino más corto hasta la salida, igual que hicieron los mohos mucilaginosos para salir de IKEA en el experimento que hizo un colega mío. Si se siguen los ápices en crecimiento mientras exploran, algo peculiar sucede en la mente de uno. Un ápice se convierte en dos, después en cuatro, en ocho... –aunque todos permanecen conectados a una sola red de micelio–. Y aquí estoy yo preguntándome si este organismo es singular o plural, para luego verme obligado a admitir que es, de algún modo improbable, ambos *a la vez*.[1]

Ver a una hifa explorando un desangelado laberinto es desconcertante, pero ¿y si lo ampliamos? Imaginemos a millones de ápices hifales, cada uno orientándose en un laberinto diferente y a la vez en una cucharadita de tierra. Vayamos más allá y volvamos a ampliarlo: imaginemos a miles de millones de ápices hifales explorando una parcela de bosque del tamaño de un campo de fútbol.

El micelio es tejido conjuntivo ecológico, la costura viva en la que buena parte del mundo está cosida con relaciones. En las aulas de las escuelas se muestran láminas de anatomía a los niños, cada una con diferentes aspectos del cuerpo humano. Una lámina muestra el esqueleto, otra el cuerpo como un

sistema de vasos sanguíneos, otra con los nervios, otra con los músculos, etc. Si hiciéramos conjuntos equivalentes de diagramas para plasmar ecosistemas, una de las capas mostraría el micelio fúngico que los atraviesa. Veríamos redes extensas y entrelazadas tendidas por el suelo, que atraviesan sedimentos sulfurosos a cientos de metros por debajo de la superficie del océano, junto a arrecifes coralinos, a través de cuerpos vegetales y animales, vivos y muertos, en vertederos de basura, alfombras, entarimados, viejos libros en bibliotecas, o motas de polvo en las casas y en los lienzos de los antiguos maestros que cuelgan en los museos. Según algunas estimaciones, si alguien desenmarañara el micelio hallado en un gramo de tierra –una cucharadita, más o menos– y lo extendiera de punta a punta, se podría estirar de 100 m a 10 km. En la práctica, es imposible medir la extensión a la que el micelio perfunde en las estructuras, sistemas y habitantes de la Tierra, pues su tejido es demasiado tupido. De hecho, el micelio es una forma de vida que desafía nuestra imaginación animal.[2]

Lynne Boddy, una profesora de ecología microbiana en la Universidad de Cardiff, se ha pasado décadas estudiando cómo se comporta el micelio para buscar alimento. Sus distinguidos estudios ilustran qué problemas pueden resolver las redes de micelio. En un experimento, Boddy dejó que un hongo xilófago creciera dentro de un trozo de madera. Después colocó el trozo en una placa. El micelio se expandió en formación radial desde el trozo en todas direcciones, formando un velloso círculo blanco. La red creciente al final se topó con otro trozo de madera y, aunque solo una pequeña parte del hongo tocó la madera, el comportamiento de toda la red cambió. El micelio dejó de explorar en todas direcciones. Replegó las partes exploratorias de su red y densificó la conexión con el trozo recién descubierto. Con el paso de los días, la red era irreconocible. Se había remodelado completamente a sí misma.[3]

Después repitió el experimento pero dándole un giro. Dejó que el hongo creciera fuera del primer trozo de madera para que descubriera el nuevo pedazo de madera. Sin embargo, en esta ocasión, antes que la red tuviera tiempo para remodelarse a sí misma, ella retiró el primer trozo de madera de la placa, quitó todas las hifas que crecían de él, y lo colocó en una placa nueva. El hongo creció a partir del primer trozo en dirección al fragmento recién descubierto. El micelio parecía que poseyera una memoria direccional, aunque la base de esta memoria sigue sin conocerse.[4]

Boddy es una persona muy práctica y habla con mesurado asombro de lo que los hongos son capaces de hacer. Su comportamiento recuerda un poco al de los mohos mucilaginosos, y los ha puesto a prueba de maneras similares. Sin embargo, en lugar de reproducir la red del metro de Tokio, Boddy animó al micelio a que resolviera las rutas más prácticas entre las ciudades de Gran Bretaña. Creó una superficie con tierra para que pareciera la masa terrestre británica, y utilizó trozos de madera colonizados por un hongo (el hifoloma de láminas verdes, o *Hypholoma fasciculare*) que representaban las ciudades. El tamaño de los trozos de madera era proporcional a la población de las ciudades a las que representaban. «Los hongos crecieron a partir de las 'ciudades' y tejieron la red de autopistas», nos explicó Boddy; «se podían distinguir la M5, M4, M1, M6. Me pareció bastante divertido».

Una manera de imaginar las redes de micelio es como enjambres de ápices hifales. Los insectos forman enjambres, una bandada de estorninos es un enjambre, como lo es un banco de sardinas. Los enjambres son patrones de comportamiento colectivo. Sin un líder ni centro de mando, un hormiguero puede trazar la ruta más corta hasta una fuente de alimento. Un enjambre de termitas puede construir gigantescos termiteros con elementos arquitectónicos sofisticados. No obstante, dicha analogía con el enjambre se queda corta rápidamente con el micelio, porque todos los ápices hifales de la red están conectados entre sí. Un termitero está compuesto por unidades de termitas. Un ápice hifal debería ser lo más cercano a lo que podríamos definir como la unidad de un 'enjambre' de micelios, aunque no podemos desmantelar una red de micelio, hifa por hifa, cuando ya ha crecido, como sí podemos desmontar un enjambre de termitas. Conceptualmente, el micelio se nos escapa de las manos. Desde el punto de vista de la red, el micelio es una sola entidad interconectada. Desde el punto de vista de un ápice hifal, el micelio es una multitud.[5]

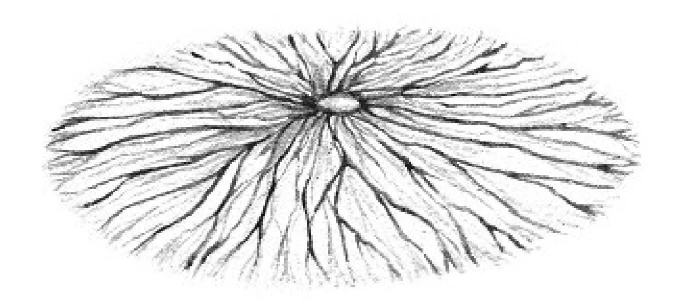
«Creo que podemos aprender mucho, como seres humanos, del micelio», reflexionó Boddy; «no puedes salir y cortar una carretera para ver cómo cambia la fluctuación del tráfico, pero puedes cortar una conexión en una red de micelio». Los investigadores han empezado a utilizar organismos basados en redes como mohos mucilaginosos y hongos para resolver problemas humanos. Los investigadores que reprodujeron la red ferroviaria de Tokio utilizando mohos mucilaginosos trabajan para incorporar el comportamiento del moho mucilaginoso en el diseño de redes de transporte urbano. Los investigadores del Unconventional Computing Lab en la Universidad del Oeste de Inglaterra (UWE

Bristol) han usado mohos mucilaginosos para calcular rutas eficaces de evacuación desde edificios en caso de incendio. Incluso se aplican las estrategias que los hongos y los mohos mucilaginosos emplean para orientarse por laberintos para resolver problemas matemáticos o para programar robots.[6]

Resolver problemas de laberintos y de enrutamiento no es un ejercicio banal porque hace mucho tiempo que se utilizan laberintos para valorar las capacidades de muchos organismos para resolver problemas, desde pulpos a abejas y seres humanos. Sin embargo, los hongos del micelio habitan en laberintos y han evolucionado para resolver problemas espaciales y geométricos. Cuál es la mejor manera de distribuir su cuerpo es una cuestión que los hongos se plantean en cada momento. Al crecer hasta convertirse en una red tupida, el micelio aumenta su capacidad para transportar, pero las redes tupidas no son buenas para explorar grandes distancias. Las redes menos densas son mejores para buscar alimento en grandes superficies, pero tienen menos interconexiones y, por tanto, son más propensas a sufrir daños. ¿Qué malabarismos hacen los hongos para dar con una solución intermedia mientras exploran una zona podrida abarrotada en busca de comida?[7]

El experimento de Boddy con los dos trozos de madera ilustra una secuencia típica de acontecimientos. El micelio empieza en un modo exploratorio y se expande en todas direcciones. Si tuviéramos que salir a buscar agua en un desierto, tendríamos que escoger una dirección para explorar; en cambio, los hongos pueden escoger todas las rutas posibles a la vez. Si el hongo descubre algo para comer, refuerza los vínculos que lo conectan con la comida y poda los que no llevan a ninguna parte. Piénsese en ello en términos de selección natural. El micelio produce vínculos en exceso. Algunos resultan ser más competitivos que otros y se engrosan. Los vínculos menos competitivos se repliegan, dejando algunas carreteras principales. Al crecer en una dirección mientras se retiran de otra, las redes de micelio incluso pueden migrar de un paisaje a otro. La raíz latina de la palabra «extravagante» significa «errar fuera de los límites». Es una buena palabra para el micelio, que incesantemente anda errabundo y sin rumbo fuera de sus límites, que no están predeterminados como sí lo están en la mayoría de cuerpos animales. El micelio es un cuerpo sin una estructura corporal.[8]

¿De qué manera una parte de la red de micelio ‘sabe’ lo que sucede en otra parte distante de la red? El caso es que el micelio se expande y, de alguna manera, debe ser capaz de permanecer en contacto consigo mismo.



**Micelio explorando una superficie plana.**

Stefan Olsson es un micólogo sueco que se ha pasado décadas intentando entender cómo las redes de micelio se coordinan a sí mismas y se comportan como un todo integrado. Hace unos años, se empezó a interesar por una de las varias especies de hongo bioluminiscente, que hace que sus setas y micelio resplandezcan en la oscuridad y puedan ayudar a atraer insectos que dispersen sus esporas. Los mineros de carbón en la Inglaterra del siglo XIX informaron de que los hongos bioluminiscentes que crecían en los puntales de madera eran lo bastante luminosos como para que ellos pudieran «verse las manos», y Benjamin Franklin propuso utilizar los hongos bioluminiscentes conocidos como «fuego fatuo» para iluminar la brújula y el indicador de profundidad del primer submarino (el *Turtle*, creado en 1775 durante la Guerra de la Independencia de Estados Unidos). La especie que Olsson había estado estudiando era la orellana estíptica, o *Panellus stipticus*. «Si la dejas crecer en tarros, se podría leer con su luz», me contó. «La tenía como lamparita en la estantería de casa. A mis hijos les encantaba.»[9]

Para monitorizar el comportamiento del micelio de Panellus, Olson lo dejó crecer en placas de cultivo de su laboratorio, y colocó dos de ellos, resplandecientes, en una caja en oscuridad total y en unas condiciones constantes. Los dejó solos durante una semana con una cámara lo suficiente sensible para que detectara su bioluminiscencia y tomara fotos cada pocos segundos. En el vídeo a cámara rápida, dos cultivos de micelio sin conectar crecen hacia fuera formando círculos irregulares en sus placas separadas, centelleando más en el centro que en sus bordes. Después de varios días –unos

dos minutos de vídeo– se produce un movimiento repentino. En uno de los cultivos, una ola de bioluminiscencia pasa por encima de la red de un borde al otro. Un día más tarde, una ola similar pasa por encima hasta unsegundo cultivo. En el marco temporal del micelio, es un gran golpe teatral. En una cuestión de momentos –de micelio–, cada red adopta un estado fisiológico diferente.[10]

«¿Qué demonios es eso?», exclamó Olsson. Dijo en broma que quizá el hongo se aburriera o deprimiera al dejarlo solo. Dejó los cultivos a oscuras varias semanas más, pero el latido no volvió a producirse. Han pasado unos años de eso pero aún no puede explicar qué lo causó ni cómo el micelio pudo coordinar su comportamiento en marcos temporales tan cortos.[11]

La coordinación miceliar es difícil de entender porque no hay centro de control. Si nos cortáramos la cabeza o detuviéramos nuestro corazón, estaríamos acabados. Y una red de micelio no tiene cabeza ni cerebro. Los hongos, al igual que las plantas, son organismos descentralizados. No hay centros de operaciones, ni ciudades capitales, ni sedes de gobierno. El control está disperso: la coordinación miceliar sucede en todas partes al mismo tiempo y en ningún lugar en particular. Un fragmento de micelio puede regenerar una red entera, o sea que un único individuo –si nos atrevemos a utilizar esta palabra– del micelio es inmortal en potencia.

Olsson estaba intrigado por las olas espontáneas de bioluminiscencia que había registrado y preparó más placas para otro experimento. Intentó clavar un lado del micelio de *Panellus* con la punta de una pipeta. La zona lesionada se iluminó enseguida. Lo que le desconcertó fue que en 10 minutos la luz se había propagado a 9 cm por toda la red. Había ido mucho más rápido que una señal química que viaja de una punta a otra del micelio.

A Olsson se le ocurrió que quizá las hifas lesionadas habían liberado una señal química volátil que se expandió por la red en una nube gaseosa, evitando así la necesidad de viajar internamente por la red. Cultivó dos micelios genéticamente idénticos uno junto al otro para probar esta posibilidad. No estaban interconectados, pero sí lo bastante cerca para que sustancias químicas lanzadas al aire sortearan el espacio que las separaba. Olsson clavó una de las redes. La luz se propagó como antes por la red herida, pero la señal no alcanzó a su vecino. Tenía que haber un sistema rápido de comunicación interna de la red. Al no saber qué era lo que pasaba, la preocupación de Olsson fue en aumento.

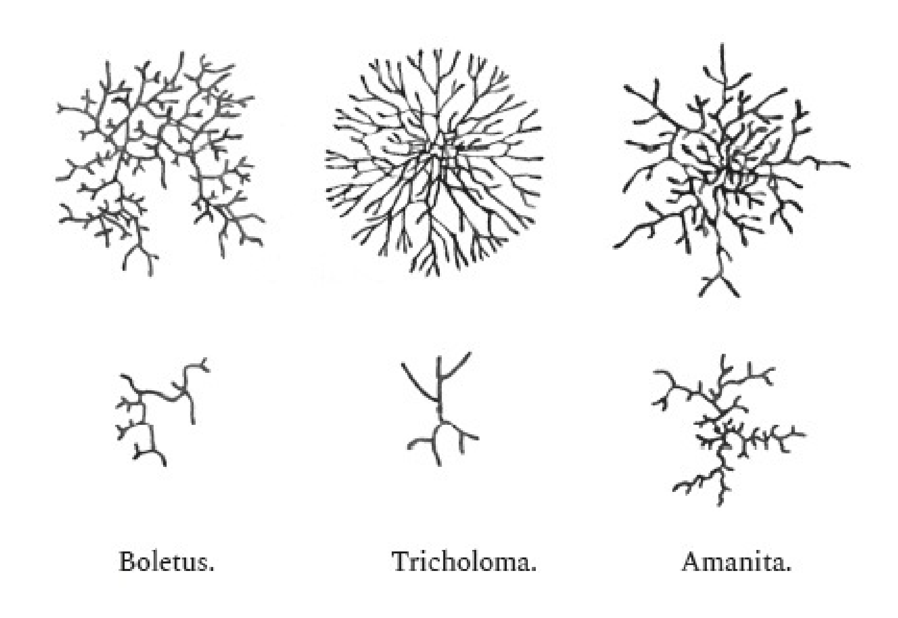
El micelio es la base de la alimentación de los hongos. Algunos organismos –como las plantas con la fotosíntesis– hacen su propia comida. Otros, como casi todos los animales, encuentran alimentos en el mundo, los comen y sus cuerpos los digieren y absorben. Los hongos siguen una estrategia diferente. Ellos digieren el mundo allí donde se encuentran y lo absorben en sus cuerpos. Sus hifas son largas y ramificadas, y de grosor unicelular –entre 2 y 25 micrómetros de diámetro, cinco veces más que el cabello humano medio–. Cuanto más entorno inmediato tocan sus hifas, más consumen. La diferencia entre animales y hongos es sencilla: los animales meten la comida en sus cuerpos, los hongos meten sus cuerpos en la comida.[12]

Sin embargo, el mundo es impredecible. Casi todos los animales lidian con la incertidumbre moviéndose. Si la comida es más fácil de encontrar en otro sitio, se desplazan hasta ese lugar. Pero para incorporarse a una irregular e impredecible fuente de alimento como hace el micelio, uno debe ser capaz de transformarse. El micelio es investigación viva, creciente y oportunista –especulación en forma corpórea–. A esta tendencia se la conoce como «indeterminismo» del desarrollo: no hay redes de micelios que sean iguales. ¿Qué forma tiene el micelio? Es como preguntar por la forma del agua. Solo podemos responder a esta pregunta si sabemos a partir de qué crece el micelio. Compárese esto con los seres humanos, que comparten todos una estructura corporal y emprenden similares viajes de desarrollo. A menos que se produzca una intervención, si nacemos con dos brazos terminaremos con dos brazos.

El micelio se aboca hacia su entorno pero su patrón de crecimiento no es variable infinitamente. Diferentes especies de hongos forman diferentes tipos de redes de micelio. Algunas especies tienen hifas estrechas, y otras, gruesas. Algunas son selectivas con el alimento, y otras no tanto. Algunas se convierten en nubes efímeras que no se alejan de su fuente de alimentación y podrían caber en una sola mota de polvo de una casa cualquiera, mientras que otras especies forman redes duraderas que se expanden kilómetros. Algunas especies tropicales no buscan ni siquiera alimento; en su lugar se comportan como animales que filtran el alimento y se convierten en redes de tupidas mallas de micelio que utilizan para atrapar hojas caídas.[13]

No importa el lugar donde crezcan los hongos, pero deben ser capaces de introducirse en su fuente de alimentación. Para hacerlo, utilizan la presión. En casos donde el micelio tiene que abrirse paso por barreras prácticamente infranqueables, como hacen los hongos causantes de enfermedades cuando

infectan plantas, desarrollan hifas especiales que pueden penetrar a presiones de 50 a 80 atmósferas y ejercer la fuerza suficiente para atravesar plásticos resistentes como Mylar y Kevlar. Un estudio calculó que si una hifa fuera tan ancha como una mano humana, sería capaz de levantar un autobús escolar de ocho toneladas.[14]




Diferentes tipos de micelio. Redibujado a partir de Fries (1943).

La mayoría de organismos pluricelulares crecen al formar y depositar nuevas capas de células. Las células se dividen para crear más células que después vuelven a dividirse. Un hígado está formado por láminas de células del hígado que se superponen unas a otras. Lo mismo pasa en un músculo o una zanahoria. Las hifas son distintas: crecen alargándose. En condiciones adecuadas, una hifa puede prolongarse indefinidamente.

A un nivel molecular, toda la actividad celular, sea fúngica o no, es una confusión de actividad rápida. Incluso con estos parámetros, los ápices hifales son una escandalera, pues están más ocupados que una cancha de baloncesto con 10 000 rebotes. Las hifas de algunas especies crecen tan rápido que hasta se las puede ver extendiéndose a tiempo real. Los ápices hifales deben depositar nuevo material a medida que avanzan. Pequeñas cámaras llenas de material de construcción celular llegan al ápice desde dentro, y se funden con él a un ritmo de hasta 600 cámaras por segundo.[15]

En 1995, el artista Francis Alÿs caminaba por São Paulo llevando un bote de pintura azul agujereado. Durante muchos días se desplazó por la ciudad dejando un reguero de pintura. La línea de pintura azul trazó un mapa de su recorrido, un retrato del tiempo. La acción de Alÿs sirve para ilustrar el crecimiento de las hifas. Alÿs en persona es el ápice que crece y el sinuoso reguero que deja tras de sí es el cuerpo de la hifa. El crecimiento se produce en el ápice; si alguien paraba a Alÿs, la línea dejaba de crecer. Puedes pensar en tu vida de esta manera. El ápice en crecimiento es el momento presente –tu experiencia vivida del ahora– que mordisquea el futuro mientras avanza. Tu trayectoria vital es el resto de la hifa, las líneas azules que has dejado en un rastro enmarañado tras de ti. Una red de micelio es un mapa de la historia reciente del hongo, y es un recordatorio útil de que todas las formas de vida son, en realidad, *procesos*, no *cosas*. El «tú» de hace cinco años se hizo con una materia diferente a la del «tú» de hoy. La naturaleza es un acontecimiento que nunca se detiene. Tal y como observó William Bateson, que acuñó la palabra «genética», «normalmente pensamos en animales y plantas como materia pero, en realidad, son sistemas por los que la materia pasa continuamente». Cuando vemos un organismo, desde un hongo a un pino, asistimos a un instante preciso de su desarrollo constante.[16]

El micelio suele crecer a partir de los ápices hifales, pero no siempre. Cuando las hifas se entrelazan para crear setas, se hinchan rápidamente con agua que absorben de su entorno –de ahí que las setas suelan aparecer después de llover–. Cuando crecen, las setas pueden generar una fuerza insólita. Cuando una seta falo hediondo atraviesa el asfalto de una carretera, produce una fuerza suficiente para levantar un objeto de 130 kg. En una popular guía de hongos publicada en la década de 1860, Mordecai Cooke reveló que

> Hace unos años, el pueblo (inglés) de Basingstoke se pavimentó; y no muchos meses después, se observó que el pavimento presentaba un desnivel inexplicable. Poco después, el misterio quedó resuelto, habían crecido grandes hongos venenosos debajo de algunas de las piedras más pesadas sacándolas de su emplazamiento. Una de las piedras medía 22 x 21 pulgadas (55,8 x 53,3 cm), y pesaba 83 libras (37,6 kg).[17]

Si pienso en el crecimiento miceliar durante más de un minuto, mi mente empieza a estirarse.

A mediados de la década de 1980, el musicólogo estadounidense Louis Sarno grabó la música del pueblo aka, mientras vivía en los bosques de la República Centroafricana. Una de estas grabaciones se llama *Women Gathering Mushrooms* (Mujeres recogiendo setas). Mientras caminan recogiendo setas, sus pasos trazan la forma subterránea de la red de micelio y las mujeres cantan entre los sonidos de los animales del bosque. Cada mujer canta una melodía diferente; cada voz cuenta una historia musical distinta. Muchas melodías se entrelazan sin dejar de ser muchas. Las voces fluyen con otras voces, entremezclándose con otras y acompañándolas.[18]

*Women Gathering Mushrooms* es un ejemplo de polifonía musical. La polifonía consiste en cantar combinando varias voces, o contar más de una historia, simultáneamente. A diferencia de las armonías de un cuarteto de baladas, las voces de las mujeres nunca se sueldan en un todo unificado. Ninguna voz se rinde a su identidad individual. Ninguna acapara el protagonismo. No hay mujer al frente, ni solista, ni líder. Si la grabación se reprodujera delante de 10 personas, y se les pidiera que reprodujeran la canción, cada una cantaría algo diferente.[19]

El micelio es polifonía en forma corpórea. Cada voz de mujer es un ápice hifal, que explora un paisaje sonoro por sí sola. Aunque cada una es libre de merodear, sus vagabundeos no pueden ser vistos como separados de las otras. Ninguna lleva la voz cantante. No hay una canción guía. No hay una planificación central. Y sin embargo, emerge una forma.

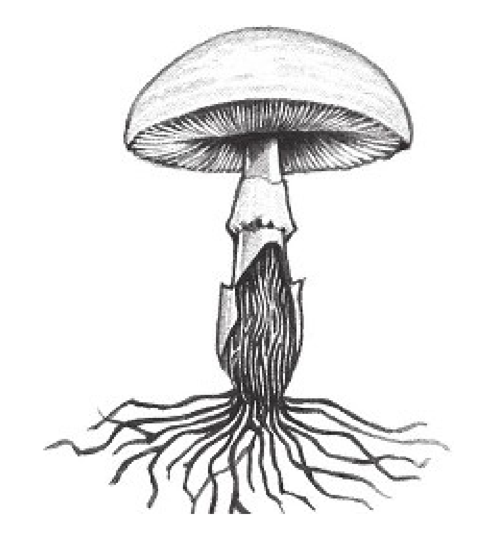
Cada vez que escucho *Women Gathering Mushrooms* consigo ceñirme a una sola voz en la música y la sigo, como si estuviera en el bosque sin despegarme de una de las mujeres. Seguir más de una línea melódica al mismo tiempo es complicado; es como intentar escuchar muchas conversaciones a la vez sin pasar de una a la otra. Varios canales de percepción tienen que combinarse en la mente, mi atención tiene que concentrarse menos en una sola línea y repartirse más. Jamás lo consigo, pero si relajo mi oído, algo más sucede. Las muchas voces se fusionan en una sola que es totalmente diferente a cada voz individual. Y nace una canción que no puedo encontrar desenmarañando la música en hebras separadas.

El micelio es lo que ocurre cuando se entremezclan las hifas de los hongos –ríos de encarnación en lugar de canales de percepción–. Sin embargo, como Alan Rayner, un micólogo especializado en desarrollo miceliar, me recordó, «el

micelio no es solo algodón amorfo», pues las hifas pueden juntarse para formar estructuras elaboradas.

Cuando miramos una seta, estamos viendo una fruta. En su lugar hay que imaginarse racimos de uva creciendo del suelo. Y después, a la vid que las ha creado, retorciéndose y ramificándose bajo tierra. Las uvas y la vid leñosa de uva están formadas por diferentes tipos de células. Pero si se corta una seta, se comprobará que está formada por el mismo tipo de célula que el micelio: las hifas.

Las hifas se convierten en otras estructuras aparte de setas. Muchas especies de hongo forman cables huecos de hifas conocidos como «cordones» o «rizomorfos», y abarcan desde finos filamentos a hebras de varios milímetros de grosor que pueden alargarse cientos de metros. Dado que las hifas individuales son tubos, y no hilos –es fácil olvidarse del espacio lleno de fluido del interior de la hifa–, los cordones y rizomorfos son grandes tuberías formadas por numerosos tubos pequeños. Pueden llevar flujo muchas veces más rápido que una sola hifa –casi 1,5 m por hora– y permiten a las redes de micelio transportar nutrientes y agua a largas distancias. Stefan Olsson me explicó que hay un bosque en Suecia donde había observado una gran red de *Armillaria* que fructificaba sobre una superficie similar a la de dos campos de fútbol. Un puente pequeño cruzaba un arroyo que atravesaba la zona. «Empecé a fijarme mejor en el puente» recordó, «y vi que el hongo había empezado a enroscar sus cordones debajo del puente. De hecho se estaba valiendo del puente para cruzar el riachuelo». Cómo los hongos coordinan el crecimiento de estas estructuras sigue siendo un misterio.[20]



**Las setas, como el micelio, están hechas de hifas.**

Los cordones y rizomorfos nos permiten recordar que las redes de micelio son redes de transporte. El mapa de carreteras de micelio de Lynne Boddy es otra buena ilustración. Y el crecimiento de las setas es otro buen recordatorio: para abrirse paso entre el asfalto, una seta debe hincharse con agua. Para que esto ocurra, el agua debe viajar rápidamente por la red de un sitio a otro y desembocar en una seta naciente mediante un pulso cuidadosamente dirigido.

En distancias cortas, las sustancias pueden ser transportadas por redes de micelio en un sistema de microtúbulos –filamentos dinámicos de proteína que se comportan como un híbrido de andamio y escalera mecánica–. Sin embargo, el transporte utilizando microtúbulos 'motores' consume mucha energía, por lo que, para recorrer distancias más grandes, el contenido de las hifas viaja por un río de fluido celular. Ambos acercamientos permiten el transporte veloz por las redes de micelio. El transporte eficiente permite que diferentes partes de una red de micelio se involucren en distintas actividades. Cuando se estaba renovando la casa señorial de Haddon Hall, en Inglaterra, se descubrió un cuerpo fructífero del hongo podredumbre seca *Serpula* en un horno de piedra en desuso. Sus conexiones miceliares retrocedían por 8 m de albañilería hasta un suelo podrido en otro lugar del edificio. El suelo era donde se alimentó, y el horno donde fructificó.[21]

La mejor manera de apreciar el flujo dentro del micelio es observar cómo se transporta su contenido por la red. En el 2013, un grupo de investigadores de la Universidad de California (Los Ángeles) dio un tratamiento al micelio para poder visualizar las estructuras celulares desplazándose por las hifas. Sus vídeos muestran hordas de núcleos aumentando en el proceso. En algunas hifas viajan más rápido que en otras, y en algunas viajan en direcciones diferentes. A veces se producen embotellamientos y el tráfico nuclear se desvía por canales de hifas. Torrentes de núcleos se unen entre sí. Los pulsos rítmicos de los núcleos –«cometas nucleares» –, ramificándose en los cruces y precipitándose por conductos laterales. Es una escena de «anarquía nuclear», como lo ironizó uno de los investigadores.[22]

El flujo ayuda a explicar cómo circula el tráfico dentro de una red de micelio pero no puede explicar por qué los hongos crecen en una dirección y no en otra. Las hifas son sensibles a los estímulos y en un momento dado se enfrentan a un

mundo de posibilidades; en lugar de extenderse en línea recta a un ritmo constante, se encaminan hacia las posibilidades que son atractivas y se alejan de las que no lo son. ¿Cómo lo hacen?

En la década de 1950, el biofísico Max Delbrück, galardonado con el Premio Nobel, se empezó a interesar por el comportamiento sensorial, y para ello tomó como organismo modelo el hongo *Phycomyces blakesleeanus*. Delbrück estaba fascinado por las destacables capacidades de percepción del *Phycomyces*. Sus estructuras fructíferas –básicamente hifas gigantes verticales– son tan fotosensibles como el ojo humano, y se adaptan a la luz brillante o tenue tal y como lo hacen nuestros ojos. Pueden detectar luz a intensidades tan bajas como la que proporciona una sola estrella, y solo quedan deslumbradas si se exponen a la luz del sol de un día radiante. Para provocar la reacción de una planta, habría que exponerla a una luz 100 veces más intensa.[23]

Al final de su carrera, Delbrück escribió que seguía convencido de que el *Phycomyces* era «el más inteligente» de los organismos multicelulares más sencillos. Además de su exquisita sensibilidad al tacto –crece preferentemente en dirección al viento a velocidades tan bajas como 1 cm por segundo, o 0,036 km por hora–, el *Phycomyces* puede detectar la presencia de objetos, un fenómeno conocido como «respuesta de la evasión». Pese a décadas de minuciosa investigación, la respuesta de la evasión sigue siendo un enigma. Los objetos a escasos milímetros del cuerpo fructífero del *Phycomyces* hacen que este se incline apartándose sin ni siquiera haberse producido el contacto. Sin importar que el objeto sea opaco o transparente, liso o áspero, el *Phycomyces* empieza a apartarse a los dos minutos. Los campos electrostáticos, la humedad, los indicios mecánicos y la temperatura han sido descartados. Hay quien teoriza que el *Phycomyces* utiliza una señal química volátil que desvía alrededor del obstáculo con minúsculas corrientes de aire, pero es algo difícil de demostrar.[24]

Aunque el *Phycomyces* es una especie extraordinariamente sensible, la mayoría de hongos son capaces de detectar y reaccionar a la luz (su dirección, intensidad o color), la temperatura, la humedad, los nutrientes, las toxinas y los campos eléctricos. Como las plantas, los hongos pueden 'ver' colores del espectro al utilizar receptores sensibles a la luz azul y la luz roja –a diferencia de las plantas, los hongos tienen además opsinas, pigmentos sensibles a la luz presentes en los bastoncillos y conos de los ojos animales–. Las hifas también pueden detectar la textura de las superficies; un estudio revela que las hifas jóvenes del hongo de la roya del frijol pueden detectar surcos a medio

micrómetro de profundidad en superficies artificiales, tres veces más somero que el espacio entre pistas de láser en un CD. Cuando las hifas se entrelazan para crear setas, adquieren una sensibilidad aguda a la gravedad. Y tal como hemos visto, los hongos mantienen innumerables canales de comunicación química con otros organismos y con ellos mismos: cuando se fusionan o practican sexo, las hifas distinguen el «uno mismo» de «el otro», y entre diferentes tipos de «el otro».[25]

Los hongos viven en un torrente de información sensorial. Y, de alguna manera, las hifas –guiadas por sus ápices– son capaces de *incorporar* toda esta transmisión de datos y decidir en qué dirección crecer. Los seres humanos, igual que la mayoría de animales, utilizamos el cerebro para integrar los datos sensoriales y decidir el mejor camino para proceder. Por ello, tendemos a buscar lugares en particular donde podría producirse la integración. Nos gusta un *donde*, pero con las plantas y los hongos, basta con preguntar «¿dónde?» para que eso nos lleve lejos. Hay diferentes partes de una red de micelio o una planta pero no son únicas. Hay mucho de todo. Entonces, ¿cómo se juntan los torrentes de datos sensoriales dentro de una red de micelio? ¿De qué manera los organismos sin cerebro relacionan percepción con acción?

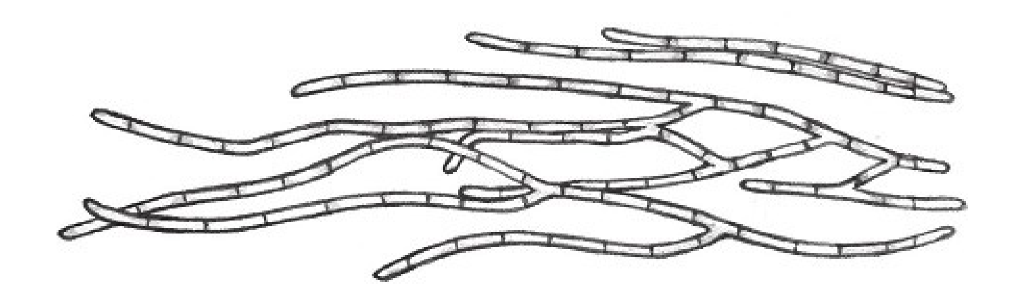
Los botánicos llevan más de un siglo batallando con estas cuestiones. En 1880, Charles Darwin y su hijo Francis publicaron un libro llamado *The Power of Movement in Plants* (El poder del movimiento en las plantas). En el último párrafo sugieren que, como los ápices de la raíz determinan la trayectoria para crecer, seguramente es en los ápices de la raíz donde están integradas las señales de diferentes partes del organismo. Los ápices de la raíz, escriben los Darwin, actúan «como el cerebro de un animal inferior […], recibiendo impresiones de los órganos sensoriales, y coordinando movimientos». La hipótesis de los Darwin ha pasado a conocerse como la hipótesis «raíz-cerebro» y es polémica, por decirlo suave. Y no es porque alguien les discuta sus observaciones: está claro que los ápices de las raíces sí que dirigen el movimiento de las raíces, de la misma manera que los ápices de crecimiento dirigen el movimiento de los brotes sobre la superficie. El punto de discordia entre botánicos reside en la utilización de la palabra «cerebro». Para algunos es una propuesta que nos permite entender mejor la vida vegetal, para otros es un disparate sugerir que las plantas poseen algo que se parezca ni siquiera un poco a un cerebro.[26]

De alguna manera, la palabra «cerebro» es una interferencia. El principal razonamiento de los Darwin es que los ápices de crecimiento –que guían raíces y

brotes– deben ser el lugar donde la información se junta para relacionar percepción y acción, y decidir el camino adecuado para crecer. Lo mismo se aplica a las hifas de los hongos. Los ápices hifales son las partes del micelio que crece, cambia de dirección, se ramifica y se fusiona. Son la parte del micelio que lo hace casi todo. Y hay muchísimas. Una red de micelio dada tiene entre cientos y miles de millones de ápices hifales, todos asimilando y procesando información sobre una base tremendamente simultánea.[27]

Los ápices hifales pueden ser los lugares donde confluyen los torrentes de datos para decidir la velocidad y dirección del crecimiento, pero ¿cómo los ápices en una parte de la red 'saben' lo que hacen los ápices en otras partes más distantes de la red? Y ahí es donde nos topamos de nuevo con el enigma de Stefan Olsson. Sus cultivos bioluminiscentes de *Panellus* fueron capaces de coordinar su comportamiento en períodos de tiempo demasiado cortos para que los causaran sustancias químicas que iban del punto A al punto B de la red. El micelio de algunas especies de hongos se convierte en «anillos de hadas» que se expanden a cientos de metros, llegan a tener cientos de años de edad y después, de alguna manera, crean un círculo de setas en una descarga sincronizada. En los experimentos de Lynne Boddy con micelio que busca alimento, solo una parte de la red descubrió el trozo nuevo de madera, pero el comportamiento de todo el micelio cambió, y lo hizo muy rápido. ¿Cómo pueden las redes de micelio comunicarse con ellas mismas? ¿Cómo viaja tan rápida la información por las redes de micelio?[28]

Hay varias posibilidades. Algunos investigadores sugieren que las redes de micelio podrían dar algunas pistas de desarrollo usando cambios de presión o de flujo –el micelio es una red hidráulica ininterrumpida como el sistema de frenos de un automóvil donde un cambio repentino en la presión en una parte podría, en principio, notarse al momento en cualquier otro sitio–. Algunos han observado que la actividad metabólica –como la acumulación y la liberación de compuestos dentro de los compartimentos de las hifas– puede tener lugar en pulsos regulares que podrían ayudar a sincronizar el comportamiento en toda la red. Olsson, por su parte, se concentró en una de las otras pocas opciones que quedaban: la electricidad.[29]



Ya hace mucho tiempo que se sabe que los animales utilizan impulsos eléctricos, o «potenciales de acción», para transmitir información entre diferentes partes de sus cuerpos. Las neuronas –las largas células nerviosas, excitables por electricidad, que coordinan el comportamiento animal– tienen su propio campo de estudio: la neurociencia. Aunque normalmente se crea que las señales eléctricas forman parte del talento animal, los animales no son los únicos que producen potenciales de acción. Las plantas y las algas los producen, y desde la década de 1970 se sabe que algunos tipos de hongos también los producen. Las bacterias también son excitables eléctricamente; las «bacterias cable» forman largos filamentos conductores de electricidad, conocidos como nanohilos. Y desde el 2015 se sabe que las colonias bacterianas pueden coordinar su actividad utilizando olas de actividad eléctrica como potenciales de acción. Sin embargo, pocos micólogos imaginaron que esta podría desempeñar un papel importante en la vida de los hongos.[30]

A mediados de la década de 1990, en el departamento de Olsson en la Universidad de Lund, en Suecia, había un grupo de investigadores trabajando en neurobiología de insectos. En sus experimentos, midieron la actividad de las neuronas al insertar microelectrodos de fino cristal en cerebros de polilla. Olsson se les acercó y les pidió si podía utilizar su equipo para realizar una pregunta sencilla: ¿Qué pasaría si reemplazaba los cerebros de polilla con micelio fúngico? A los neurocientíficos les picó la curiosidad. En principio, las hifas de los hongos deberían estar preparadas para transportar impulsos eléctricos. Están recubiertas con proteínas aislantes que deberían permitir que las olas de actividad eléctrica recorrieran largas distancias sin desvanecerse –las neuronas animales están recubiertas por una vaina parecida que las aísla–. Y además, las células en el micelio son continuas unas con otras y eso permitiría posiblemente que los impulsos iniciados en una parte de la red llegaran a otra parte sin interrupción.

Olsson estudió bien qué especie de hongo sometería al experimento. Supuso que si los hongos tenían un sistema de comunicación eléctrico, sería más fácil detectarlo en especies que necesitaban comunicarse a grandes distancias. Así es que, para asegurarse el tiro, escogió un hongo de miel, o *Armillaria*, la especie que forma las plusmarquistas redes de micelio que se extienden kilómetros y pueden llegar a tener miles de años de edad.

Cuando Olsson insertó los microelectrodos en las hebras hifales de *Armillaria*, detectó unos impulsos regulares similares a los potenciales de acción, disparando a una frecuencia muy parecida al de las neuronas sensoriales de los animales: cuatro impulsos por segundo que viajaban por las hifas a una velocidad de 1 mm por segundo, como mínimo, unas 10 veces más rápido que el ritmo más rápido de flujo fluido detectado en una hifa de hongo. Le llamó la atención, pero el hecho en sí mismo no insinuaba que los impulsos formasen la base de un sistema rápido de señales. La actividad eléctrica solo puede desempeñar un papel en la comunicación de los hongos si es sensible a la estimulación. Y Olsson decidió medir la reacción del hongo a los trozos de madera, un alimento para esta especie.[31]

Montó el equipo y colocó un trozo de madera sobre el micelio a varios centímetros de los electrodos, y lo que descubrió fue extraordinario. Cuando la madera entró en contacto con el micelio, la frecuencia del disparo de los impulsos se duplicó. Cuando retiró el trozo de madera, esta frecuencia recuperó la normalidad. Para asegurarse de que los hongos no estaban reaccionando al peso del trozo de madera, colocó un fragmento de plástico incomestible del mismo tamaño y peso sobre el micelio. El hongo no reaccionó.

Olsson siguió probando con otras especies de hongos, incluidos un hongo micorrícico que crece en el sistema de raíces de una planta, *Pleurotus* (o micelio de seta ostra), y *Serpula* (el hongo podredumbre seca que se halló fructificando en el horno de Haddon Hall). Todos generaron impulsos similares a potenciales de acción y fueron sensibles a toda una suerte de estímulos diferentes. Olsson teorizó que las señales eléctricas eran una manera razonable que tenía una amplia variedad de hongos para mandar mensajes entre diferentes partes de sí mismos, mensajes con información sobre «fuentes de alimento, heridas, condiciones locales internas al hongo, o la presencia de otros individuos cerca».[32]

Muchos de los neurobiólogos con los que trabajó Olsson se entusiasmaron con la idea de que las redes de micelio pudieran estar comportándose como cerebros. «Fue la primera reacción de toda esta gente que estudia insectos», recordó Olsson; «se quedaron pensando en estas grandes redes de micelio en el bosque mandándose señales eléctricas sobre sí mismos. Se imaginaron que quizá allí aguardaban grandes cerebros». Tengo que admitir que yo tampoco había sido capaz de darme cuenta del parecido superficial. Los descubrimientos de Olsson insinuaban que el micelio podría formar redes extraordinariamente complejas de células excitables por electricidad. Los cerebros también son redes extraordinariamente complejas de células excitables por electricidad.

«No creo que sean cerebros» me dijo Olsson. «Tenía que ser precavido con el concepto de cerebro. Cuando alguien lo menciona, la gente enseguida piensa en cerebros como los nuestros donde tenemos el lenguaje y donde procesamos pensamientos para tomar decisiones». Su cautela estaba justificada, pues «cerebro» es una palabra cargada con conceptos muy arraigados al mundo animal. «Cuando decimos "cerebro", todas las asociaciones son con cerebros animales», continuó explicándome. Además, tal y como puntualizó, los cerebros se comportan como tales por su mera construcción. La arquitectura de los cerebros animales es muy diferente a la de las redes de micelio. En los cerebros animales, las neuronas conectan con otras neuronas en intersecciones llamadas sinapsis. En las sinapsis, las señales se pueden mezclar con otras señales. Las moléculas neurotransmisoras pasan por las sinapsis y permiten que neuronas diferentes se comporten de formas diferentes –algunas excitan a otras neuronas, algunas las reprimen–, y las redes de micelio no comparten ninguna de estas características.

Pero si los hongos usaron olas de actividad eléctrica para transmitir señales por una red, al menos ¿no podemos pensar en el micelio como un fenómeno *parecido* al cerebro? Según Olsson, quizá había otras formas para controlar los impulsos eléctricos en las redes de micelio para crear «circuitos, puertas y osciladores como los del cerebro». En algunos hongos, las hifas están divididas en compartimentos por poros, que pueden estar regulados con sensibilidad. Abrir o cerrar un poro cambia la potencia de la señal que pasa de un compartimento a otro, ya sea química, de presión o eléctrica. Si los cambios súbitos en las cargas eléctricas dentro del compartimento de una hifa pudieran abrir o cerrar un poro, reflexionó Olsson, una explosión de impulsos podría cambiar la forma en la que las señales posteriores pasarían por la hifa y formar un sencillo circuito cerrado

de aprendizaje. Y lo que es más, las hifas se ramifican. Si dos impulsos convergieran en un lugar, ambas influirían en la conductividad de los poros, incorporando señales de diferentes ramas. «No hace falta saber mucho de ordenadores para darse cuenta de que dichos sistemas pueden crear puertas de decisión», me dijo Olsson. «Si combinamos estos sistemas en una red flexible y versátil, tenemos la posibilidad para que ‘un cerebro’ pueda aprender y recordar». Mantuvo la palabra «cerebro» a cierta distancia, sujetada con los fórceps de unas comillas simples para recalcar que su afirmación tenía mucho de metáfora.[33]

Que los hongos podían utilizar señales eléctricas como base para una rápida comunicación no se le escapó a Andrew Adamatzky, el director del Unconventional Computing Lab. En el 2018 insertó electrodos en toda una agrupación de setas ostra que crecía en bloques de micelio y detectó olas espontáneas de actividad eléctrica. Cuando acercó una llama a una seta, diferentes setas de la agrupación reaccionaron con una nítida sacudida eléctrica. Poco después, publicó un artículo llamado «Towards fungal computer» (Hacia la computadora fúngica). En él, proponía que las redes de micelio ‘computaran’ información codificada en descargas de actividad eléctrica. Si supiéramos cómo reaccionaría una red de micelio a un estímulo determinado, razonaba Adamatzky, podríamos tratarla como una placa de circuito impreso vivo. Si estimuláramos el micelio, por ejemplo con una llama o una sustancia química, podríamos introducir datos en la computadora fúngica.[34]

Una computadora fúngica quizá suene de maravilla pero la bioinformática es un campo en rápido crecimiento. Adamatzky se ha pasado años desarrollando sistemas para emplear mohos mucilaginosos como sensores y ordenadores. Estos prototipos de biocomputadora usan dichos mohos para resolver toda suerte de problemas geométricos. Las redes de mohos mucilaginosos pueden ser modificados –p. ej., cortando una conexión– para alterar el conjunto de «funciones lógicas» puestas en marcha por la red. La idea de Adamatzky de una «computadora fúngica» es solo una aplicación computacional de los mohos mucilaginosos a otro tipo de organismo basado en una red.[35]

Tal y como Adamatzky indica, las redes de micelio de algunas especies de hongos son más convenientes para computar que los mohos mucilaginosos. Forman redes más longevas y no mutan tan rápido a nuevas formas. Además son más grandes, con más intersecciones entre hifas. Es en estas intersecciones –lo que Olsson describió como «puertas de decisión», y lo que Adamatzky describe

como «procesadores elementales»– donde las señales de diferentes ramas de la red interactuarían y se mezclarían. Adamatzky calcula que una red de hongo de miel que se expande a más de 15 ha tendría casi un billón de unidades procesadoras.

Para Adamatzky, el objetivo de las computadoras fúngicas no es el de reemplazar los chips. Las reacciones de los hongos son demasiado lentas para eso. Además, cree que los seres humanos podrían emplear el micelio que crece en un ecosistema como un «sensor medioambiental a gran escala». Y argumenta que las redes fúngicas controlan un gran número de transmisiones de información como parte de su existencia cotidiana. Si pudiéramos enchufarnos a las redes de micelio e interpretar las señales que utilizan para procesar la información, podríamos conocer mejor lo que ocurre en un ecosistema. Los hongos podrían informar de los cambios en la calidad del suelo, la pureza del agua, la polución o cualquier otro elemento medioambiental al que son sensibles.[36]

Aún nos queda mucho camino por recorrer. Computar con organismos vivos basados en redes es algo que está en estado embrionario y aún hay muchas preguntas sin respuesta. Olsson y Adamatzky han mostrado la sensibilidad del micelio a la electricidad, pero no han demostrado que los impulsos eléctricos pueden unir un estímulo a una respuesta. Es como si tú te hubieras clavado un alfiler en el dedo del pie y ellos hubieran detectado que el impulso nervioso ha viajado por todo tu cuerpo pero no hubieran sido capaces de calibrar tu reacción al dolor.[37]

Este es un desafío para el futuro. En los 23 años que median entre los dos estudios, el de Olsson sobre el micelio y el de Adamatzky sobre las setas ostra, no se han realizado más investigaciones sobre las señales eléctricas en hongos. Olsson me explicó que si tuviera los recursos para seguir esta línea de investigación, intentaría demostrar una clara respuesta fisiológica a los cambios en la actividad eléctrica y decodificar los patrones de los impulsos eléctricos. Su sueño es «conectar un hongo a un ordenador y comunicarlo con él», emplear señales eléctricas para hacer que el hongo cambie su comportamiento. «Se podrían hacer todo tipo de curiosos y maravillosos experimentos si consiguiéramos hacerlo bien.»[38]

Estos estudios levantan un vendaval de interrogantes ¿Son las formas de vida basadas en una red o los mohos mucilaginosos capaces de una forma de cognición? ¿Podemos pensar en su comportamiento como algo inteligente? Si la inteligencia de otros organismos no se parece a la nuestra, ¿a qué se puede parecer? ¿Podemos darnos cuenta de ella?

Entre los biólogos hay muchas discrepancias. Tradicionalmente, la inteligencia y la cognición han sido definidas en términos humanos como algo que, como mínimo, requiere de un cerebro y, más generalmente, de una mente. La ciencia cognitiva surgió a partir del estudio de los seres humanos y, por supuesto, colocó a la mente humana en el centro de su investigación. Sin una mente, los clásicos ejemplos de procesos cognitivos –lenguaje, lógica, razonamiento, reconocerse a uno mismo en un espejoparecen imposibles. Todos exigen un funcionamiento mental de alto nivel. Pero cómo definimos la inteligencia y la cognición es una cuestión que admite muchos matices. Para muchos, el punto de vista cerebro-centrista es demasiado limitado. La idea de que se puede trazar una línea clara para separar a los no humanos de los humanos con «mentes de verdad» y «comprensión de verdad» ha sido catalogada de mito arcaico por el filósofo Daniel Dennet. Los cerebros no desarrollaron sus trucos desde cero, y muchas de sus características reflejan procesos más ancestrales que ya existían mucho antes de que surgieran los cerebros reconocibles.[39]

Charles Darwin, que ya lo anotó en 1871, siguió una línea pragmática: «La inteligencia se basa en cuán eficiente se vuelve una especie en hacer las cosas que necesita para sobrevivir». Es una perspectiva que ha sido recordada por muchos biólogos y filósofos contemporáneos. La raíz latina de la palabra «inteligencia» significa «escoger entre». Muchos tipos de organismos sin cerebro –plantas, hongos e incluso mohos mucilaginosos– reaccionan a sus entornos de maneras flexibles, solucionan problemas y toman decisiones entre opciones de procedimientos alternativos. El procesamiento de información compleja obviamente no está restringido a los mecanismos internos de los cerebros. Algunos utilizan el término «inteligencia de enjambre» a la hora de describir el comportamiento de los sistemas sin cerebro para resolver problemas. Otros apuntan que se puede pensar que el comportamiento de estas formas de vida basadas en una red surge a partir de la cognición «mínima» o «basal», y razonan que la cuestión que deberíamos preguntarnos no es si un organismo tiene cognición o no; más bien deberíamos evaluar el *grado* en el que un

organismo podría ser consciente de ello. En todos estos puntos de vista, los comportamientos inteligentes pueden surgir sin cerebros; una red dinámica y receptiva es todo lo que se necesita.[40]

Desde hace mucho tiempo se piensa en el cerebro como una red dinámica. En 1940, el neurobiólogo Charles Sherrington, galardonado con el Premio Nobel, describió el cerebro humano como «un telar encantado donde millones de lanzaderas luminosas tejen un dibujo que se difumina». Hoy, la «neurociencia de redes» es el nombre que se da a la disciplina que intenta entender cómo emerge la actividad mental a partir de la actividad interconectada de millones de neuronas. Un solo circuito neuronal dentro del cerebro de uno no puede originar un comportamiento inteligente; en cambio, el comportamiento de una sola termita no puede levantar la elaborada arquitectura de un termitero. No 'sabe' más un circuito neuronal individual sobre lo que pasa que lo que 'sabe' una sola termita sobre la estructura de un termitero, pero un gran número de neuronas puede construir una red de la que pueden brotar fenómenos sorprendentes. Bajo este punto de vista, los comportamientos complejos –incluidas las mentes y las texturas matizadas de la experiencia vivida y consciente– brotan de redes complejas de neuronas que se remodelan a sí mismas de forma flexible.[41]

Los cerebros son solo una de dichas redes, una manera de procesar información. Incluso en el mundo de los animales, pueden suceder muchas cosas sin ellos. Los investigadores de la Universidad Tufts así lo han ilustrado con sorprendentes experimentos donde utilizaban platelmintos. Estos gusanos planos son un organismo modelo muy estudiado por su capacidad de regenerarse: si se le corta la cabeza, crece otra cabeza, cerebro y todo lo demás. También se puede entrenar a los platelmintos. Los investigadores se preguntaron si, al entrenar a un platelminto a recordar elementos de su entorno y al cortarle después la cabeza, conservaría su memoria cuando le crecieran una cabeza y cerebro nuevos. Y sorprendentemente así fue. Al parecer, la memoria de los platelmintos residía en una parte de sus cuerpos ajena a su cerebro. Estos experimentos sugieren que hasta en el cuerpo de los animales que dependen de un cerebro, las redes flexibles que apuntalan comportamientos complejos no tienen por qué alojarse solo en una pequeña región de la cabeza. Hay otros ejemplos, como el pulpo, donde casi todos los nervios no están en el cerebro sino repartidos por todo el cuerpo. Sus muchos tentáculos pueden explorar y probar el entorno sin implicar al cerebro. Incluso si se le amputan los tentáculos, estos son capaces de moverse y agarrar.[42]

De hecho, muchos tipos de organismos han desarrollado redes flexibles para ayudar a resolver los problemas que la vida presenta. Al parecer, los organismos con micelio fueron unos de los primeros en hacerlo. En el 2017, los investigadores del Museo Real de Historia Natural de Suecia publicaron un estudio donde describen micelio fosilizado, conservado en roturas de antiguas corrientes de lava colada. Los fósiles muestran filamentos ramificados que «se tocan y se enredan entre sí». La enmarañada red que forman, las dimensiones de las hifas, las dimensiones de estructuras tipo esporas y el dibujo de su crecimiento recuerdan, y mucho, al micelio de los hongos de nuestros días. Es un descubrimiento extraordinario porque los fósiles tienen 2400 millones de años, más de 1000 millones de años antes de que se creyera que los hongos se habían ramificado del árbol de la vida. No hay forma de identificar el organismo, pero fuera o no un hongo real, tenía un hábito miceliar muy claro. Es un descubrimiento que convierte el micelio en uno de los gestos conocidos más tempranos hacia la compleja vida pluricelular, una maraña original, una de las primeras redes vivas. El micelio ha aguantado insólitamente inalterado durante más de la mitad de los 4000 millones de años de historia de la vida, a través de innumerables cataclismos y transformaciones globales catastróficas.[43]

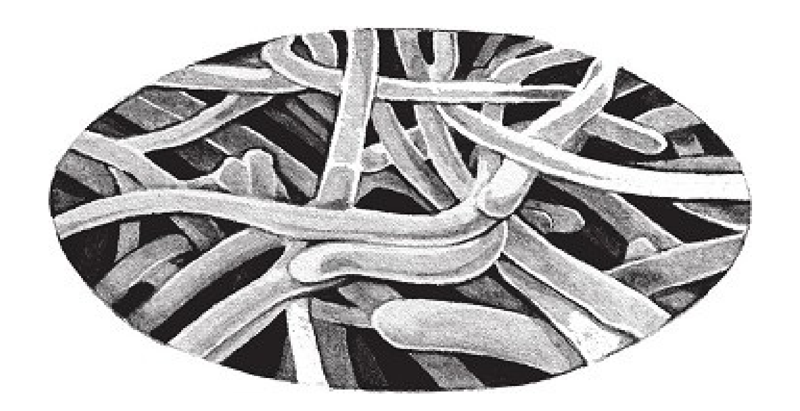
Barbara McClintock, que obtuvo el Premio Nobel por su trabajo sobre genética de maíz, describió las plantas como extraordinarias «más allá de nuestras expectativas más silvestres». Y no porque han encontrado maneras de hacer lo que los seres humanos hacen, sino porque una vida arraigada a un lugar las ha animado a desarrollar innumerables mecanismos ‘ingeniosos’ para lidiar con desafíos que los animales evitan corriendo, sin más. Podríamos decir lo mismo de los hongos. El micelio es una solución ingeniosa en extremo, una respuesta genial a algunos de los desafíos más básicos de la vida. Los hongos de micelio no actúan como nosotros, y albergan redes flexibles que no dejan de remodelarse a sí mismas. *Son* redes flexibles que no dejan de remodelarse a sí mismas.[44]

McClintock resalta que es importante «sentir algo por el organismo», para adquirir la paciencia que facilite «escuchar lo que tiene que decirte». Pero con los hongos, ¿realmente tenemos alguna posibilidad? Las vidas del micelio son tan *otras*, sus posibilidades tan extrañas... Pero quizá no son tan lejanas como parecen a primera vista. Muchas culturas tradicionales entienden la vida como un todo enmarañado. Hoy, la idea de que todas las cosas están interconectadas se

ha utilizado tanto que la han degradado a cliché. La idea de «red de vida» forma la base de las ideas científicas modernas de la naturaleza; la escuela de la «teoría de sistemas», que surgió en el siglo XX, entiende a todos los sistemas –desde el tráfico de vehículos a los gobiernos y ecosistemas– como redes dinámicas de interacción; el campo de la inteligencia artificial resuelve problemas utilizando redes neuronales artificiales; muchos aspectos de la vida humana son continuos con las redes digitales de internet; la neurociencia de redes nos invita a entendernos a *nosotros mismos* como redes dinámicas. La «red», al igual que un músculo trabajado, se ha hipertrofiado en un concepto maestro. Se utilizan las redes para darle un sentido a todo, y cuesta pensar en un tema que no las haya utilizado.[45]

Aun así, seguimos esforzándonos por encontrarle sentido al micelio. Le pregunté a Lynne Boddy qué aspectos de las vidas del micelio siguen siendo los más misteriosos. «Ah…, buena pregunta», titubeó; «la verdad es que no lo sé. Hay *tantas cosas*. ¿Cómo funciona el micelio de los hongos *como redes*? ¿Cómo perciben su entorno? ¿Cómo devuelven los mensajes a otras partes de sí mismos? ¿Cómo se integran después esas señales? Grandes preguntas en las que apenas nadie parece estar pensando. Y aun así, comprender estas cosas es crucial para entender cómo los hongos hacen casi todo lo que hacen. Tenemos técnicas para hacer este trabajo, pero ¿quién se fija en la biología básica de los hongos? No mucha gente. Creo que es una situación muy preocupante. No hemos juntado muchas de las cosas que hemos descubierto en un entendimiento general». Se rió. «¡El campo está a punto para la cosecha! Pero no creo que haya mucha gente que esté recolectando nada.»

En 1845, Alexander von Humboldt observó que «cada paso que damos para conocer mejor la intimidad de la naturaleza nos conduce a la entrada de nuevos laberintos». Canciones polifónicas como *Women Gathering Mushrooms* surgen a partir del enmarañamiento de voces; el micelio surge a partir del enmarañamiento de hifas. Pero aún tiene que surgir un entendimiento sofisticado del micelio. Estamos, de pie, en la entrada a uno de los laberintos más antiguos de la vida.[46]



# 3

## LA INTIMIDAD DE LOS DESCONOCIDOS

*El problema era que no sabíamos a quién nos referíamos cuando decíamos «nosotros».*

**ADRIENNE RICH**

El 18 de junio del 2016, el módulo de descenso de una nave espacial *Soyuz* aterrizó en una desolada estepa de Kazajistán. Se sacó con cuidado a los tres tripulantes de la cápsula chamuscada tras haber pasado un tiempo en la Estación Espacial Internacional (ISS). Los astronautas no estaban solos cuando se precipitaron a la Tierra. Debajo de sus asientos había centenares de organismos vivos encerrados herméticamente en una caja.

Entre las muestras había varias especies de líquenes que habían sido enviadas al espacio durante un año y medio como parte del Biology and Mars Experiment. El BIOMEX es un consorcio internacional de astrobiólogos que utilizan bandejas montadas en la parte exterior de la ISS –una pieza de un sistema conocido como plataforma EXPOSE– para incubar especímenes biológicos en condiciones extraterrestres. «Esperemos que regresen sanas y salvas», me comentó Natushka Lee, miembro del equipo de líquenes de BIOMEX, pocos días antes de que se programara el aterrizaje. No estaba seguro de a quien se refería con ese «sanas y salvas», pero poco después Lee contactó conmigo para decirme que todo había ido bien. Había recibido un correo electrónico de uno de los jefes de la investigación del Centro Aeroespacial Alemán de Berlín y, aliviada, me leyó el titular del asunto: «Ya tenemos las bandejas del EXPOSE de vuelta en la Tierra»; sonrió y me dijo: «Pronto tendremos nuestras muestras».[1]

Se han lanzado al espacio varios organismos con tolerancias extremas, desde esporas bacterianas a algas de vida libre, hongos que viven en rocas (endolitos) y tardígrados (animales microscópicos conocidos como «osos de agua»). Los hay que pueden sobrevivir si se les protege de los efectos dañinos de la radiación solar. Pero pocos, aparte de algunas especies de líquenes, pueden

sobrevivir a las condiciones del espacio exterior, bañados en radiación cósmica sin filtrar. Tan destacables son sus aptitudes, que estos líquenes se han convertido en formas de vida modélicas para la investigación astrobiológica, organismos ideales «para diferenciar –tal y como escribe un investigador– los límites y las limitaciones de la vida terrestre».[2]

Pero no es la primera vez que los líquenes ayudan a los seres humanos a entender los límites de la vida tal y como la conocemos. Los líquenes son misterios vivientes. Desde el siglo XIX, han desatado acalorados debates sobre qué es lo que constituye un individuo autónomo. Cuanto más nos acercamos a los líquenes, más desconocidos nos parecen. Hasta la fecha, confunden el concepto que tenemos de identidad y obligan a preguntarnos dónde termina un organismo y empieza otro.

En su libro impecablemente ilustrado *Art Forms of Nature* (1904), el biólogo y artista Ernst Haeckel retrata de forma muy gráfica una variedad de líquenes. Sus líquenes brotan y forman capas de forma delirante. Rugosidades venosas dan paso a burbujas delicadas; hay tallos que se convierten en dientes y platos. Litorales escabrosos se encuentran con pabellones sobrenaturales, mostrando formas ribeteadas, con recovecos y grietas. Fue Haeckel quien, en 1866, acuñó la palabra «ecología». Esta describe el estudio de las relaciones entre organismos y sus entornos, tanto los lugares donde habitan como el bosquejo de relaciones que los sustentan. Inspirado por la obra de Alexander von Humboldt, el estudio de la ecología partió de la idea de que la naturaleza es un todo interconectado, «un sistema de fuerzas activas». Los organismos no podían ser entendidos aisladamente.[3]

Tres años más tarde, en 1869, el botánico suizo Simon Schwendener publicó un artículo que avanzaba la «hipótesis de la naturaleza dual de los líquenes». En él, se atrevía a decir que los líquenes no eran un organismo individual, como se había creído hacía mucho tiempo. En su lugar, razonaba que estaban compuestos por dos entidades bastante diferentes: un hongo y un alga. Schwendener proponía que el componente fúngico del liquen (conocido hoy como micobionte) ofrecía protección física y adquiría nutrientes para sí mismo y para las células de las algas. El socio algar (conocido hoy como fotobionte, un papel que, a veces, desempeñan las bacterias fotosintéticas) recogía luz y dióxido de carbono para producir el azúcar que proporcionaba energía. Según la

visión de Schwendener, los socios fúngicos eran «parásitos, pero con la sabiduría de estadistas». Los socios algares eran «sus esclavos […], a los que habían buscado […] y obligado a trabajar a su servicio». Juntos se convirtieron en el cuerpo visible del liquen. En su relación, ambos socios eran capaces de crear vida en lugares donde ninguno de los dos podría sobrevivir solo.[4]

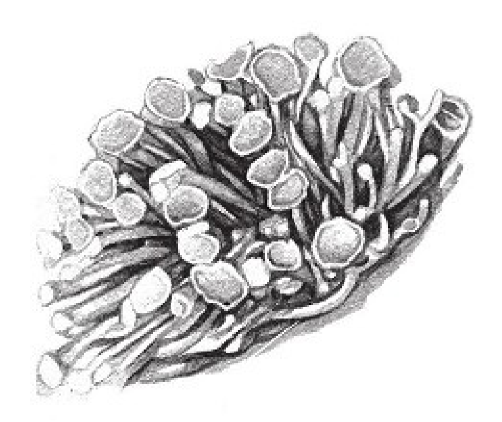
La sugerencia de Schwendener fue tajantemente refutada por sus colegas liquenólogos. La idea que dos especies diferentes se asociaran para crear un nuevo organismo con una identidad propia y distinta escandalizó a muchos. «¿Un parasitismo útil y estimulante? –refunfuñó un contemporáneo–. ¿Quién ha escuchado semejante barbaridad antes?» Otros lo desestimaron, tachándolo de «romance espectacular», de una «unión antinatural entre un alga damisela cautiva y un hongo amo tirano». Algunos fueron más moderados. «¿Lo ves? –escribió la micóloga inglesa Beatrix Potter, más conocida por sus libros para niños–. Nosotros no creemos en la teoría de Schwendener.»[5]

Más preocupante para los taxónomos –que se esfuerzan por clasificar la vida en líneas claras de ascendencia– era la posibilidad de que un solo organismo pudiera contener dos linajes distintos. Después de la teoría de la evolución por selección natural de Charles Darwin, publicada por primera vez en 1859, se entendió que las especies nacieran unas de otras por *divergencia*. Sus linajes evolutivos se bifurcaban, como las ramas de un árbol. El tronco del árbol se dividía en ramas, que se ramificaban en ramas más pequeñas y estas en ramitas. Las especies eran las hojas en las ramitas del árbol de la vida. Sin embargo, la hipótesis dual sugería que los líquenes eran cuerpos de organismos con orígenes bastante distintos. En el interior de los líquenes, las ramas del árbol de la vida que habían estado bifurcándose durante cientos de millones de años estaban haciendo algo totalmente inesperado: *converger*.[6]

En décadas posteriores cada vez fueron más los biólogos que adoptaron la hipótesis dual, pero muchos discreparon con el retrato de la relación de Schwendener. Y no eran preocupaciones sensibleras: la opción de Schwendener por la metáfora era un obstáculo para responder a las grandes preguntas que planteaba la hipótesis dual. En 1877, el botánico alemán Albert Frank acuñó la palabra «simbiosis» para describir la asociación convivencial de hongos y algas. Mientras estudiaba los líquenes, le quedó claro que necesitaba una palabra nueva, una que no perjudicara la relación que describía. Poco después, el biólogo

Heinrich Anton de Bary adoptó el término de Frank y lo amplió para referirse a todo el espectro de interacciones entre cualquier tipo de organismo, abarcando desde el parasitismo en un polo a las relaciones de beneficio mutuo en el otro.[7]

En los años siguientes, los científicos postularon nuevas e importantes tesis sobre la simbiosis, a destacar las aseveraciones de Frank de que los hongos quizá ayudan a las plantas a obtener nutrientes del suelo (1885). Todos citaban la hipótesis dual de los líquenes para apoyar sus ideas. Cuando se descubrieron algas alojadas en el interior de corales, esponjas y *Elysia* verdes, fueron descritas por un investigador como «líquenes animales». Años más tarde, cuando se observaron por primera vez virus dentro de bacterias, su descubridor los describió como «microlíquenes».[8]



**Liquen:** ***Niebla***.

Dicho de otro modo, los líquenes pasaron a convertirse rápidamente en un principio biológico. Eran el organismo que abría la puerta a la idea de simbiosis, un concepto que desafiaba las corrientes predominantes en el pensamiento evolutivo de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, y que se puede resumir mejor con la descripción de la vida que hizo Thomas Henry Huxley: es como un «espectáculo de gladiadores […] en el que el más fuerte, el más rápido y el más astuto vive para luchar otro día». A raíz de la hipótesis dual, ya no se podía pensar en evolución solo en términos de competición y conflicto; los líquenes se habían convertido en un caso estereotipado de colaboración entre reinos.[9]

Los líquenes cubren cual costra el 8% de la superficie del planeta, más que la que cubren los bosques lluviosos tropicales. Cubren rocas, árboles, tejados, cancelas, barrancos y la superficie del desierto. Algunos son de color camuflaje marrón oliva. Otros, verde lima o amarillo eléctrico. Los hay que parecen manchas, otros son como arbustos pequeños, o como cuernos. Algunos se asemejan a alas de murciélago de cuero y medio cerradas, y otros, como así lo escribe la poetisa Brenda Hillman, parecen «colgados en *hashtags*». Incluso algunos se alojan en escarabajos, cuyas vidas dependen del camuflaje que les proporcionan. Los líquenes sin ataduras –conocidos como «vagantes» o «erráticos»– vagan y no viven *sobre* nada en particular. En contra de la «historia aburrida» de sus entornos, observa Kerry Knudsen, el conservador de los líquenes en el Jardín Botánico de Riverside, de la Universidad de California, los líquenes «parecen cuentos de hadas».[10]

Yo sí que me quedé encantado con los líquenes de las islas que hay enfrente de la línea de costa de Columbia Británica, en el litoral oeste de Canadá. Visto desde arriba, la costa se desmigaja en el océano: los acantilados no son duros; la tierra se fragmenta poco a poco en islotes y estrechos, y después en canales y pasos; cientos de islas afloran desperdigadas frente al litoral y algunas de ellas no superan el tamaño de una ballena –la más grande, la isla de Vancouver, es la mitad de larga que Gran Bretaña–. Casi todas las islas son de sólida roca granítica, y los valles y las cimas de los montes submarinos están erosionados delicadamente por glaciares.

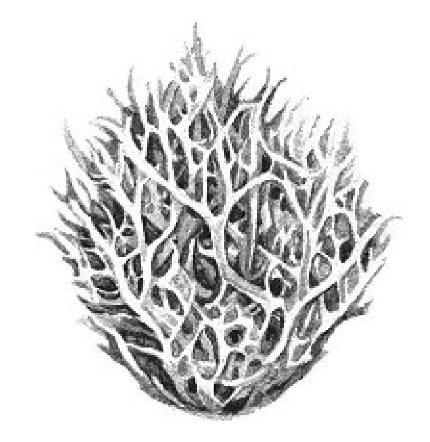
Unos días al año, unos amigos y yo nos apretujamos en un velero de 8,5 m y navegamos por las islas. La embarcación, llamada *Caper*, tiene un casco verde oscuro, sin quilla, y una vela roja. Llegar a tierra firme desde el *Caper* es complicado. Salimos en un chinchorro inestable cuyos remos se salen de los escálamos cada dos por tres. Y se requiere mucho arte para detenerse en la costa, pues las olas levantan y empujan el bote hacia las rocas y nos lo arrebata cuando intentamos desembarcar. Pero ya en la orilla, allí están los líquenes. Me he pasado horas absorto en los mundos que crean –islas de vida en un mar de roca–. Los nombres que se utilizan para describirlos suenan a sufrimientos, palabras que se traban en la lengua: «crustoso» (que forman costra), «foliáceo» (de hoja), «escuamuloso» (de escamas), «leproso» (pulverulento), «fruticuloso» (ramificado). Los líquenes fruticulosos cuelgan y se condensan; los crustosos y escuamulosos trepan y se infiltran; los foliáceos crean capas y se desconchan. Algunos prefieren vivir en superficies encaradas al este, otros las prefieren

dirigidas al oeste. Algunos escogen vivir en salientes húmedos, otros en ranuras húmedas. Los hay que se embarcan en parsimoniosas batallas para ahuyentar o alterar a sus vecinos. Incluso algunos habitan en superficies que otros líquenes ya muertos han dejado desprotegidas y desconchadas. Pasan a parecer los archipiélagos y continentes de un atlas desconocido, de ahí que el *Rhizocarpon geographicum*, o liquen geográfico, recibiera tal nombre. Las superficies más antiguas del mundo en que vivimos están picoteadas por siglos de vida y muerte de los líquenes.

El cariño que siente el liquen por la piedra ha modificado la cara del planeta, y sigue haciéndolo, a veces en sentido literal. En el 2006, las caras de los presidentes estadounidenses esculpidas en el monte Rushmore se limpiaron con mangueras de presión para quitar más de 60 años de crecimiento liquénico y así alargar la vida del monumento conmemorativo. Los presidentes no están solos. «Cada monumento –escribe el poeta Drew Milne– está forrado por liquen.» En el 2019, los residentes de la isla de Pascua lanzaron una campaña para asear las monumentales cabezas de piedra, o moais. Calificados por los isleños como «lepra», los líquenes deforman los rasgos de las estatuas y ablandan la roca hasta darle una consistencia ‘arcillosa’.[11]

Los líquenes extraen los minerales de la piedra en un proceso en dos fases conocido como «meteorización». Primero, deshacen físicamente las superficies con la fuerza de su crecimiento. Y segundo, despliegan un arsenal de ácidos potentes y compuestos aglutinantes de minerales para absorber la piedra. La capacidad de los líquenes para corroer los convierte en una fuerza geológica, pero no solo disuelven los rasgos físicos del mundo, hacen mucho más: cuando los líquenes mueren y se descomponen, crean los primeros suelos de nuevos ecosistemas. De hecho, los líquenes son la manera en la que la masa mineral inanimada del interior de las piedras es capaz de ingresar en los ciclos metabólicos de los seres vivos. Probablemente, una parte de los minerales que llevamos en el cuerpo, en algún momento han pasado a través de un liquen. Ya sea en las lápidas de un cementerio o alojados en trozos de granito de la Antártida, los líquenes son intermediarios que habitan en la línea que separa la vida de la no vida. Y eso me quedó muy claro cuando, desde el *Caper*, miré el rocoso litoral canadiense. Encima de la línea de marea hay unos metros de líquenes y musgos, y justo después, ya lejos del agua, es donde empiezan a aparecer los árboles más grandes, arraigados a grietas donde se han podido formar suelos jóvenes.[12]

La cuestión de qué es una isla, y qué no lo es, es fundamental para el estudio de la ecología y la evolución. No es menos importante para los astrobiólogos, incluidos los que integran el equipo de BIOMEX, muchos de los cuales lidian con la teoría de la «panspermia», del griego *pan* (todo) y *sperma* (semilla). La panspermia aborda la cuestión de si los planetas, también, son islas, y de si la vida puede viajar por el espacio entre cuerpos celestes. Es una idea que ha estado circulando desde tiempos inmemoriales, aunque no adquirió la forma de hipótesis científica hasta principios del siglo XX. Algunos defensores argumentan que la vida en sí misma llegó de otros planetas. Por el contrario, hay quienes defienden que se desarrolló en la Tierra *y* en otras partes, y que los períodos de transformación evolutiva espectacular en la Tierra fueron desencadenados por la llegada de fragmentos de vida venidos del espacio. También los hay que apuestan por una «panspermia blanda», según la cual la vida *per se* creció en la Tierra pero los componentes químicos básicos para su desarrollo llegaron del espacio. Circulan muchas teorías sobre cómo habría sido ese transporte interplanetario. La mayoría son variaciones sobre un tema: organismos atrapados en asteroides u otros escombros propulsados desde planetas a raíz de colisiones con meteoritos, y lanzados al espacio antes de colisionar con otro cuerpo planetario en el que pueden, o no, crear vida.[13]



**Liquen: *Ramalina*.**

A finales de la década de 1950, mientras Estados Unidos se preparaba para lanzar cohetes al espacio, el biólogo Joshua Lederberg empezó a preocuparse por la posibilidad de contaminación celeste (fue Lederberg quien, en el 2001, acuñó la palabra «microbioma»). Ahora los seres humanos son capaces de esparcir organismos terrestres por el sistema solar. Pero aún más preocupante era pensar

que los seres humanos pudieran traer organismos extraterrestres a la Tierra capaces de provocar alteraciones ecológicas –o peor aún, causar enfermedades–. Lederberg escribió urgentemente a la National Academy of Sciences para avisarles de una posible «catástrofe cósmica». Le prestaron atención y emitieron un comunicado oficial donde expresaban su preocupación. Todavía no existía una palabra para describir la ciencia de la vida extraterrestre, de modo que Lederberg acuñó una: «exobiología». Era la primera versión del campo que hoy conocemos como astrobiología.[14]

Lederberg fue un prodigio. Se matriculó en la Universidad de Columbia Británica a la edad de 15 años, y a los veintipocos hizo un descubrimiento que ayudó a transformar nuestro entendimiento de la historia de la vida. Descubrió que las bacterias podían transferirse material genético entre sí. Una bacteria podía adquirir un rasgo de otra bacteria 'horizontalmente'. Las características obtenidas horizontalmente son aquellas que no heredamos 'verticalmente' de los progenitores; uno las recoge por el camino. Nosotros estamos habituados a este principio: cuando aprendemos o enseñamos algo, somos parte de un intercambio horizontal de información. Buena parte de la cultura y comportamiento humanos se transmiten de esta manera. Sin embargo, para los seres humanos involucrarse en una transferencia genética horizontal tal y como hacen las bacterias es una posibilidad fabulosa, aunque ya haya sucedido en ocasiones, en fases muy pretéritas de nuestra historia evolutiva. La transferencia genética horizontal significa que los genes –y los rasgos que codifican– se contagian. Es como si nos fijáramos en un rasgo sin señalizar tirado en el arcén de la carretera, lo probáramos y de repente nos diéramos cuenta de que habíamos adquirido un par de hoyuelos. O que nos encontráramos a alguien en la calle y nos intercambiáramos el pelo, el suyo rizado por el mío liso. O adquiriéramos el color de sus ojos. O rozáramos un perro lobo sin querer y desarrolláramos un ansia por correr varias horas al día.[15]

El descubrimiento de Lederberg le valió el Premio Nobel a la edad de 33 años. Antes del descubrimiento de la transferencia genética, las bacterias, como el resto de organismos, se entendían como islas biológicas. Los genomas eran sistemas cerrados. No había forma de adquirir un ADN nuevo a mitad del transcurso de una vida, de procurarse genes que se habían desarrollado 'fuera de sitio'. Pero la transferencia genética horizontal alteró esta imagen porque mostraba los genomas bacterianos como lugares cosmopolitas, formados por genes que se habían desarrollado por separado durante millones de años. La

transferencia genética horizontal insinuaba, tal y como los líquenes habían hecho antes, que las ramas del árbol evolutivo que hacía tanto tiempo se habían bifurcado podían converger dentro del cuerpo de un solo organismo.

Para las bacterias, la transferencia genética horizontal es lo habitual –la mayoría de los genes de cualquier bacteria no comparten un historial evolutivo sino que se adquieren poco a poco, como los objetos que acumulamos en una casa–. De esta manera, una bacteria puede adquirir características ‘preparadas’ que, muchas veces, aceleran la evolución. Al intercambiar ADN, una bacteria inofensiva puede hacerse resistente a los antibióticos y metamorfosearse en una superbacteria virulenta en un solo movimiento. A lo largo de las últimas décadas, ha quedado claro que las bacterias no son las únicas que poseen esta capacidad, aunque siguen siendo sus practicantes más expertas: el material genético se ha intercambiado horizontalmente entre todas las esferas de la vida.[16]

Las ideas de Lederberg fueron matizadas con la paranoia de la Guerra Fría. En sus manos, la panspermia pasó a parecer una transferencia genética a escala cósmica. Por primera vez en la historia, los seres humanos eran capaces –en teoría– de infectar la Tierra y otros planetas con organismos que no se habían desarrollado en la propia Tierra. La vida en nuestro planeta ya no se podía considerar como un sistema genéticamente cerrado, una isla planetaria en un mar impenetrable. Justo cuando las bacterias podían adelantar la evolución recogiendo ADN horizontalmente, la llegada de ADN desconocido a la Tierra podía ‘cortocircuitar’ el proceso, ya de por sí ‘complicado’, de la evolución, con consecuencias potencialmente catastróficas.[17]

Uno de los principales objetivos de BIOMEX es averiguar si las formas de vida pueden sobrevivir a un viaje espacial. Las condiciones exteriores a la piel protectora de la atmósfera de la Tierra son hostiles. Entre los muchos peligros están los enormes niveles de radiación del sol y de otras estrellas; un vacío que hace que cualquier material biológico, incluidos los líquenes, se seque casi de inmediato; y ciclos rápidos de congelación, descongelación y calentamiento, con temperaturas que van de los −120ºC a los +120ºC en 24 horas y vuelta a empezar.[18]

El primer intento para enviar líquenes al espacio no acabó bien. En el 2002, un cohete *Soyuz* sin tripulación que llevaba las muestras sufrió una explosión y se estrelló poco después de despegar de una base espacial rusa. Meses después, cuando la nieve se había derretido, se recuperaron los restos de la carga. «Por curioso que parezca –informaron los investigadores responsables– el experimento LICHENS fue una de las pocas piezas identificables del cohete siniestrado, y descubrimos que, a pesar de las circunstancias, los líquenes […] aún mostraban cierto grado de actividad biológica.»[19]

Desde entonces, la capacidad de los líquenes para sobrevivir en el espacio ha quedado demostrada en varios estudios, y los descubrimientos son, en líneas generales, los mismos. Las especies de líquenes más resistentes pueden recuperar totalmente su actividad metabólica a las 24 horas de haber sido rehidratados, y son capaces de reparar buena parte de los daños 'causados por el espacio'. De hecho, la especie *Circinaria gyrosa*, la más fuerte, tiene un índice tan alto de supervivencia que tres estudios recientes decidieron exponer muestras a niveles de radiación incluso más elevadas de las que reciben en el espacio para poner a prueba sus «límites extremos de supervivencia». Como era de esperar, una dosis de radiación podía matar los líquenes, pero la cantidad requerida para alterar sus células era enorme. Las muestras de líquenes expuestas a 6 kilograys de rayos gamma –seis veces más de lo que se utiliza normalmente para esterilizar alimentos en Estados Unidos, y 12000 veces más que la dosis letal para seres humanos– ni se alteraron. Cuando la dosis se duplicó a 12 kilograys –2,5 veces más que la dosis letal para tardígrados–, la capacidad de los líquenes para reproducirse quedó dañada, aunque sobrevivieron y continuaron con la fotosíntesis sin problemas aparentes.[20]

Para Trevor Goward, el conservador de la colección de líquenes de la Universidad de Columbia Británica, las tolerancias extremas de los líquenes son ejemplo de lo que llama el «efecto pararrayos de los líquenes». Los líquenes invitan a fogonazos cognitivos, o «entendimiento sobrecargado», en palabras de Goward. El efecto pararrayos de los líquenes describe lo que ocurre cuando impactan sobre conceptos familiares, astillándolos para crear nuevas formas. La idea de simbiosis es uno de esos ejemplos. La supervivencia en el espacio es otro, como lo es la amenaza que los líquenes plantearon al sistema de clasificación biológica. «Los líquenes nos cuentan cosas de la *vida* –exclamó Goward–. *Nos informan*.»[21]

Goward es, ante todo, un obseso de los líquenes (ha aportado unos 30 000

especímenes de liquen a la colección de la universidad) y no deja de ser un taxónomo de líquenes (ha dado nombre a tres géneros y descrito 36 nuevas especies de líquenes). Pero tiene algo de místico. «Me gusta decir que los líquenes colonizaron la superficie de mi mente hace muchos años», me dijo soltando una risita. Vive en los lindes de un gran espacio natural de Columbia Británica y gestiona una web llamada Ways of Enlichenment. Para Goward, pensar profundamente en los líquenes cambia la forma de comprender la vida; son organismos que nos pueden llevar a nuevas preguntas y a nuevas respuestas: «¿Qué relación tenemos con el mundo? ¿En qué consistimos?». La astrobiología lanza estas preguntas a escala cósmica. No es de extrañar, pues, que los líquenes figuren –no como protagonistas pero sí con mucha presencia– en las primeras filas y el centro del debate de la panspermia.

Más cerca nos queda, sin embargo, que los líquenes y el concepto que encarnan han desencadenado preguntas existenciales más profundas. A lo largo del siglo XX, el concepto de colaboración entre reinos transformó el entendimiento científico de la complejidad que habían adquirido las formas de vida. Las preguntas de Goward quizá suenen teatrales, pero han sido precisamente los líquenes y su forma de vida simbiótica las que nos han llevado a replantearnos nuestra relación con el mundo.

La vida está dividida en tres dominios. Las bacterias forman uno. Las arqueas –microbio unicelular parecido a las bacterias pero que construye sus membranas de forma diferente– constituyen otro. Los eucariotas son el tercero. Somos eucariotas, como lo son el resto de organismos pluricelulares, ya sean animales, plantas, algas u hongos. Las células de eucariotas son más grandes que las de las bacterias y arqueas, y se organizan a sí mismas alrededor de varias estructuras especializadas. Una de dichas estructuras es el núcleo, que contienen casi todo el ADN de una célula. Las mitocondrias –los lugares donde se produce la energía– son otra. Las plantas y algas tienen una estructura más: los cloroplastos, donde tiene lugar la fotosíntesis.[22]

En 1967, la visionaria bióloga estadounidense Lynn Margulis se convirtió en una tenaz defensora de una polémica teoría que daba a la simbiosis un papel central en la evolución de los primeros años de la vida. Margulis argumentó que algunos de los momentos más significativos de la evolución habían sido el resultado de la unión –y convivencia– de diferentes organismos. Los eucariotas aparecieron cuando un organismo unicelular envolvió una bacteria, que continuó viviendo simbióticamente dentro de él. Las mitocondrias fueron las

descendientes de estas bacterias. Y los cloroplastos fueron los descendientes de la bacteria fotosintética que había sido envuelta por una célula eucariota previa. Toda la vida compleja que le siguió, incluida la vida humana, fue una historia de la imperecedera «intimidad de los desconocidos».[23]

La idea de que los eucariotas habían surgido «por fusión e incorporación» había fluctuado por el pensamiento biológico desde principios del siglo XX pero se había mantenido en el dintel de la 'distinguida sociedad biológica'. En 1967, poco había cambiado, y el manuscrito de Margulis fue rechazado hasta 15 veces antes que, por fin, fuera aceptado. Tras su publicación, sus ideas fueron combatidas con saña, como había sucedido antes con teorías similares. (En 1970, el microbiólogo Roger Stanier remarcó cáusticamente que «la especulación evolutiva […] puede ser considerada como un hábito inofensivo, como comer cacahuetes, a menos que asuma la forma de obsesión, en cuyo caso se convierte en un vicio».) Sin embargo, en la década de 1970 Margulis demostró tener razón. Nuevas herramientas genéticas revelaron que las mitocondrias y los cloroplastos habían empezado efectivamente como bacterias de vida libre. Desde entonces, se han descubierto otros ejemplos de endosimbiosis. Las células de algunos insectos, por ejemplo, están habitadas por bacterias que alojan otras bacterias.[24]

La propuesta de Margulis equivalía a una hipótesis dual de vida eucariótica ancestral. No es de sorprender, pues, que movilizara los líquenes para luchar por su causa –tal y como habían hecho los partidarios anteriores de su punto de vista a principios de siglo XX–. Argumentó que se podía considerar a células eucarióticas ancestrales como «bastante análogas» a los líquenes. Aunque los líquenes siguieron ocupando un lugar destacado en su trabajo en décadas posteriores. «Los líquenes son ejemplos destacables de una innovación que surge de la colaboración – escribió después–. La asociación es mucho más que la suma de sus partes.»[25]

La teoría endosimbiótica, tal y como se pasó a conocer, reescribió la historia de la vida. Fue uno de los cambios más espectaculares del siglo XX en el mundo de la biología. El biólogo evolutivo Richard Dawkins siguió felicitando a Margulis por «no abandonar (la teoría) y hacerla pasar de la heterodoxia a la ortodoxia». «Es uno de los grandes logros de la biología evolutiva del siglo XX –continuó Dawkins–, y admiro profundamente la valentía y tenacidad absolutas que mostró Lynn Margulis.» El filósofo Daniel Dennett describió la teoría de

Margulis como «una de las ideas más bonitas con las que él jamás se había encontrado» y a Margulis como «uno de los héroes de la biología del siglo XX».[26]

Entre las principales propuestas de la teoría endosimbiótica destaca la que dice que paquetes enteros de aptitudes han sido adquiridos en un destello, en términos evolutivos, ya desarrollado, a partir de organismos que no son los padres de uno, ni las especies de uno, ni el reino, ni siquiera el dominio de uno. Lederberg demostró que las bacterias podían adquirir genes horizontalmente. La teoría endosimbiótica propugnaba que los organismos unicelulares habían adquirido todas las bacterias horizontalmente. La transferencia genética horizontal transformó los genomas bacterianos en lugares cosmopolitas; la endosimbiosis transformó las células en lugares cosmopolitas. Los antecesores de todos los eucariotas actuales adquirieron una bacteria con una capacidad preexistente de crear energía a partir del oxígeno. Igualmente, los antecesores de las plantas actuales adquirieron horizontalmente la bacteria con la capacidad para hacer la fotosíntesis, ya desarrollada.

De hecho, esta formulación no es lo bastante exacta. Los antecesores de las plantas actuales no adquirieron una bacteria con la capacidad para realizar la fotosíntesis: surgieron de la combinación de organismos que podían hacer la fotosíntesis con organismos que no podían. En los 2000 millones de años que han convivido, ambos han creado una dependencia mayor hasta la actualidad, y hoy ninguno puede vivir sin el otro. Dentro de las células eucarióticas, las separadas ramas del árbol de la vida se enroscan y confunden en un nuevo linaje inseparable; se funden, o anastomosan, como hacen las hifas de los hongos.[27]

Los líquenes no restablecen exactamente el origen de la célula eucariótica pero, como señala Goward, sí que «riman» con él. Los líquenes son cuerpos cosmopolitas, lugares donde las vidas se encuentran. Un hongo por sí solo no puede realizar la fotosíntesis, pero si se asocia a un alga o una bacteria fotosintética puede adquirir está capacidad horizontalmente. De igual modo, un alga o una bacteria fotosintética no pueden crear capas resistentes de tejido protector ni absorber piedra, pero si se asocian a un hongo acceden a estas capacidades. Juntos, estos organismos tan distantes taxonómicamente hablando construyen formas de vida compuestas capaces de posibilidades totalmente nuevas. En comparación con las células de las plantas que no pueden separarse de sus cloroplastos, los líquenes mantienen relaciones abiertas. Esto les da flexibilidad.

En algunas ocasiones, los líquenes se reproducen sin romper su relación –fragmentos de un liquen que alberguen todos los socios simbióticos pueden desplazarse y viajar a la vez hasta una nueva ubicación y crecer allí como un liquen nuevo–, y en otras ocasiones, los hongos de los líquenes pueden liberar esporas que viajan solas; al llegar a un sitio nuevo, el hongo debe encontrar un fotobionte compatible y establecer su relación desde cero.[28]

Al unir fuerzas, los hongos asociados pasan a ser parte del fotobionte, y los fotobiontes, parte del hongo. Aun así, los líquenes no se parecen a ninguno. De la misma manera que los elementos químicos hidrógeno y nitrógeno se combinan para hacer agua, un compuesto que no tiene nada que ver con sus elementos constitutivos, los líquenes también son un fenómeno incipiente, mucho más que la suma de sus partes. Como enfatiza Goward, es una verdad tan simple que se nos escapa fácilmente. «A menudo digo que las únicas personas que *no* pueden ver un liquen son los liquenólogos. Y eso pasa porque ellos, como científicos que son, se fijan en las partes. El problema es que si te fijas en las partes del liquen, *no vas a ver el liquen propiamente dicho*.»[29]

Son precisamente las formas emergentes de los líquenes las interesantes desde un punto de vista astrobiológico. Tomando las palabras de un estudio, «es difícil imaginar un sistema biológico que sintetice mejor las características de la vida en la Tierra». Los líquenes son biosferas pequeñas que incluyen organismos fotosintéticos y otros que no lo son, combinando así los principales procesos metabólicos de nuestro planeta. Los líquenes son, en cierto modo, miniplanetas, mundos a pequeña escala.[30]

Pero, ¿qué hacen exactamente los líquenes cuando están en órbita alrededor de la Tierra? Para ahorrarse el problema de monitorizar muestras biológicas mientras están en el espacio, los investigadores del equipo de BIOMEX recogieron especímenes de la especie resistente *Circinaria gyrosa* de la meseta árida del centro de España y se los llevaron a unas instalaciones que simulaban las condiciones ambientales de Marte. Expusieron los líquenes a condiciones ambientales del espacio aunque en la Tierra para poder medir la actividad de los líquenes en tiempo real. Pero no hubo mucho por medir. Una hora después del ‘prendido’ de Marte, los líquenes habían reducido su actividad fotosintética

prácticamente a cero. El resto de tiempo permanecieron aletargados en el simulador y reanudaron su actividad normal cuando fueron rehidratados 30 días después.[31]

De sobras es conocido que la capacidad de los líquenes para sobrevivir en condiciones extremas depende de si entran en un estado de animación suspendida –hay estudios que demuestran que pueden ser felizmente resucitados después de pasar 10 años de deshidratación–. Si sus tejidos se deshidratan y después se congelan, se descongelan y se calientan, no sufrirán grandes daños. La deshidratación, además, los protegen de las consecuencias más peligrosas de los rayos cósmicos: radicales libres altamente reactivos, producidos cuando la radiación parte las moléculas del agua en dos, que dañan la estructura del ADN.

Al parecer, el letargo es la estrategia principal de los hongos para sobrevivir, pero tienen otras. Los líquenes más resistentes poseen gruesas capas de tejido que bloquean los rayos perniciosos. Además, producen más de un millar de sustancias químicas que no se hallan en ninguna otra forma de vida, algunas de las cuales actúan como protector solar. Dichas sustancias, producto de sus metabolismos innovadores, han llevado a los líquenes a toda suerte de relaciones con los seres humanos a lo largo de los años: desde medicinas (antibióticos) a perfumes (musgo de roble), tintes (*tweeds*, tela de cuadros escoceses, el indicador de pH *litmus*), o incluso comida (un liquen es uno de los principales ingredientes en la mezcla de especias del *garam masala*). Muchos hongos que producen compuestos importantes para el ser humano –como los mohos de la penicilina– vivieron como líquenes en los albores de su historia evolutiva pero dejaron de hacerlo. Algunos investigadores sugieren que varios de estos compuestos, también la penicilina, quizá los desarrollaran los líquenes ancestrales como estrategias defensivas y hoy persisten como legados metabólicos de la relación.[32]

Los líquenes son «extremófilos», organismos capaces de vivir, desde nuestro punto de vista, en otros mundos. Las tolerancias de los extremófilos son inconcebibles. Si se recogen muestras en aguas termales volcánicas o chimeneas hidrotermales sobrecalentadas del fondo oceánico, se descubrirán microbios extremófilos que viven sin inmutarse, o eso parece. Hace poco, el Deep Carbon Observatory descubrió que más de la mitad de todas las bacterias y arqueas de la Tierra –denominados «intraterrenos»– existen a varios kilómetros bajo tierra, sometidas a una presión intensa y un calor extremo. Estos mundos subterráneos

son tan diversos como el bosque lluvioso amazónico y albergan miles de millones de toneladas de microbios, cientos de veces el peso colectivo de todos los seres humanos del planeta. Y algunos especímenes tienen miles de años.[33]

Los líquenes tampoco se quedan cortos. Es más, su capacidad para sobrevivir en condiciones extremas de lo más diversas los cualificaba como «poliextremófilos». En las zonas más cálidas y secas de los desiertos del mundo se hallarán líquenes medrando como costras sobre terreno quemado. Los líquenes desempeñan un papel ecológico crucial en estos entornos al estabilizar la superficie de arena de los desiertos, reducir las tormentas de arena e impedir una desertificación mayor. Algunos crecen en grietas o poros del interior de piedras sólidas. Los autores de un estudio que revelaba la presencia de líquenes dentro de pedazos de granito, confiesan de entrada que no tienen ni idea de cómo estos líquenes llegaron hasta allí. Varias especies de líquenes pueden vivir con un éxito desmedido en los valles secos de McMurdo (Ántártida) –un ecosistema tan despiadado que a veces se compara a las condiciones ambientales de Marte–. Los largos períodos de temperaturas gélidas, los altos niveles de rayos ultravioleta y la casi ausencia de agua, al parecer, no les afecta. Incluso después de sumergirlos en nitrógeno líquido a -195ºC los líquenes reviven rápidamente. Y viven mucho más tiempo que la mayoría de organismos. El liquen más longevo vive en la Laponia sueca, tiene más de 9000 años.[34]

En el mundo ya de por sí curioso de los extremófilos, los líquenes son extraordinarios por dos razones. La primera, son complejos organismos pluricelulares. Y la segunda, surgen de una simbiosis. La mayoría de extremófilos no desarrollan semejante sofisticación de formas ni relaciones duraderas. De ahí que, en parte, los líquenes sean tan interesantes para los astrobiólogos. Un liquen moviéndose por el espacio es un extraordinario fardo de vida –un ecosistema que viaja todo en uno–. ¿Hay mejores organismos para emprender viajes interplanetarios?[35]

Aunque varios estudios hayan mostrado que los líquenes son capaces de sobrevivir en el espacio exterior, para ser transportados entre planetas, tendrían que sobrevivir a dos desafíos extra. Para empezar, el impacto de su expulsión de un planeta por un meteorito. Y después, la reentrada a una atmósfera de un planeta. Ambos presentan riesgos considerables. Sin embargo, el impacto de su expulsión quizá no les afecta demasiado. En el 2007, los investigadores demostraron que los líquenes podían resistir ondas sísmicas a presiones de 10-50 gigapascales, 100-500 veces mayor que la presión en el fondo de la fosa de las

Marianas, el lugar más profundo de la Tierra. Esto queda dentro del alcance de las presiones de impacto experimentadas por las rocas catapultadas a una velocidad de escape desde la superficie de Marte. La reentrada atmosférica a un planeta podría plantear más de un problema. En el 2007, muestras de bacterias y un liquen alojadas en una roca se adosaron al escudo térmico de una cápsula de reentrada. Al atravesar la atmósfera de la Tierra, las muestras quedaron expuestas durante 30 segundos a temperaturas de más de 2000ºC. En el proceso, las rocas se fundieron parcialmente y se cristalizaron en nuevas formas. Después de examinar los restos, se comprobó que no quedaba ninguna célula viva.[36]

Pero este descubrimiento no ha desanimado a los astrobiólogos. Algunos argumentan que las formas de vida alojadas en lo más hondo de grandes meteoritos estarían protegidas de estas condiciones extremas. Otros señalan que casi todo el material que llega a la Tierra desde el espacio lo hace en mini meteoritos, un tipo de polvo cósmico. Estas pequeñas partículas experimentan menos fricción y temperaturas más bajas cuando entran a la atmósfera, y quizá transportan formas de vida de un modo más seguro a la Tierra que las cápsulas espaciales. Tal y como expresan entusiasmados algunos investigadores, la cuestión sigue abierta[37].

Nadie sabe cuándo empezaron a desarrollarse los líquenes. Los fósiles más antiguos tienen más de 400 millones de años pero probablemente hubiera organismos similares a los líquenes antes. Desde entonces los líquenes se han desarrollado de forma independiente entre cinco y doce veces. Hoy, una de cada cinco especies de hongos conocidas forman líquenes, o «liquenizan». Algunos hongos (como el moho *Penicillium)* solían *liquenizar* pero ya no lo hacen; se han desliquenizado. Algunos hongos han cambiado a diferentes tipos de socio fotosintético –o *reliquenizado*– a lo largo del curso de sus historias evolutivas. Para algunos hongos, la *liquenización* sigue siendo una opción de vida; pueden vivir como líquenes o no depender de sus circunstancias.[38]

Resulta que los hongos y las algas se juntan a la más mínima provocación. Si se cultivan muchos tipos de hongos de vida libre y algas juntos, en cuestión de días se transformarán en una simbiosis mutualmente beneficiosa. Diferentes tipos de hongos, diferentes tipos de algas –al parecer no importa–. Surgen relaciones simbióticas totalmente nuevas en menos tiempo de lo que tarda una costra en cicatrizar. Estos descubrimientos destacables, excepcionales destellos

del «nacimiento» de nuevas relaciones simbióticas, fueron publicados en el 2004 por investigadores de la Universidad de Harvard. Cuando se cultivaron hongos con algas, se fusionaron en formas visibles que parecían bolas verdes blandas. No eran las elaboradas formas de líquenes representadas por Ernst Haeckel y Beatrix Potter. Pero, claro, no se habían pasado millones de años haciéndose compañía.[39]

No obstante, no se podía asociar cualquier hongo con cualquier alga. Para que se produjera una relación simbiótica tenía que cumplirse una condición primordial: cada socio tenía que ser capaz de hacer algo que el otro no pudiera conseguir solo. No importaba tanto la identidad de los socios como sí su ajuste ecológico. En palabras del teórico evolutivo W. Ford Doolittle, era la «canción, y no el cantante» lo que parecía ser importante. Este descubrimiento aclaró la capacidad de los líquenes para sobrevivir en condiciones extremas. Tal y como señala Trevor Goward, los líquenes, por su naturaleza, son una especie de «boda de penalti» que se produce en condiciones demasiado severas para que cada asociado sobreviva solo. Sin importar cuándo se formaron los primeros líquenes, su mera existencia implica que la vida fuera del liquen era menos tolerable, que juntos pudieron cantar una «canción» metabólica que individualmente fueron incapaces de cantar. Visto de esta manera, la extremofilia de los líquenes, su capacidad para vivir al límite, es tan antigua como los líquenes mismos, y una consecuencia directa de su forma de vida simbiótica.[40]

No hace falta ir a los valles secos de McMurdo o a una instalación que simula las condiciones ambientales de Marte para ver la extremofilia de los líquenes en acción. La mayoría de litorales ya sirven. Es en la costa rocosa de Columbia Británica donde he visto esa tenacidad tan atractiva de los líquenes. A un pie o así encima de los percebes, justo encima de la línea del agua, hay una franja negra de 60 cm de ancho que se extiende por la roca. De cerca recuerda el alquitrán cuarteado en una dársena. A modo de cinta ribetea la línea de la costa, que cobra su importancia cuando navegamos alrededor de las islas. La usamos cuando echamos el ancla pues nos indica la altura de la marea; es un indicador infalible de los límites de la línea del agua. La señal de tierra firme.

El liquen negro es un tipo de liquen pero nadie hubiera dicho que era un organismo vivo. Y ciertamente no crece formando estructuras elaboradas. Sin embargo, en casi toda la costa oeste de Norteamérica, esta especie, la *Hydropunctaria maura*, es el primer organismo que vive encima de los márgenes del agua. Si uno se fija bien verá algo parecido en las líneas de pleamar de todo

el mundo. Los líquenes bordean casi todos los litorales rocosos y empiezan allí donde paran las algas, aunque los hay que descienden al agua. Cuando un volcán crea una isla nueva en medio del océano Pacífico, lo primero que crece en la roca desnuda son líquenes, que llegan como esporas o fragmentos transportados por el viento o por las aves. Lo mismo ocurre cuando un glaciar retrocede. El crecimiento de líquenes en rocas recién expuestas es una variante sobre la teoría de la panspermia. Estas superficies despojadas son islas inhóspitas, posibilidades remotas para la mayoría de organismos. Podrían ser perfectamente otros planetas: estériles, chamuscadas por una radiación intensa y expuestas a tormentas despiadadas y fluctuaciones de temperatura.[41]

Los líquenes son lugares donde un organismo se despliega en un ecosistema y donde el ecosistema se comprime en un organismo. Se mueven entre «todos» y «conjuntos de las partes». Es complicado moverse entre las dos perspectivas. La palabra «individuo» viene del latín, que significa indivisible. ¿Es todo el liquen el individuo? ¿O son sus miembros constitutivos, las partes, los individuos? Hasta me atrevería a decir ¿formulamos bien la pregunta? Los líquenes son un producto no tanto de sus partes como de los intercambios entre esas partes. Los líquenes son redes establecidas de relaciones; nunca paran de liquenizar; son verbos pero también sustantivos.[42]

Una de las personas que alteró estas categorías es un liquenólogo de Montana llamado Toby Spribille. En el 2016, Spribille y sus colegas publicaron un artículo en la revista *Science* que puso patas arriba la hipótesis dual. Spribille describió un nuevo participante fúngico en uno de los linajes de líquenes más evolucionados, uno de los socios que había pasado totalmente desapercibido durante el siglo y medio de doloroso escrutinio.[43]

El descubrimiento de Scribille fue por accidente. Un amigo le desafió a pulverizar un liquen y a secuenciar el ADN de todos sus organismos participantes. No tenía que haber sorpresas. «Los manuales eran claros» –me contó–. «Solo podía haber dos socios». No obstante, cuanto más se fijaba Spribille, menos parecía que fuera el caso. Cada vez que analizaba un liquen de este tipo, descubría organismos adicionales junto al hongo y el alga previstos. «Me ocupé de estos organismos 'contaminantes' durante mucho tiempo –recordó– hasta que me convencí a mí mismo que no podía haber líquenes sin

‘contaminación’, y descubrimos que los ‘contaminantes’ eran extraordinariamente consistentes. Cuanto más indagábamos, más parecía que fueran la regla y no la excepción.»

Hace tiempo que los investigadores conjeturan que los líquenes podrían involucrar a socios simbióticos adicionales. Después de todo, los líquenes no albergan microbiomas. *Son* microbiomas, llenos de hongos y bacterias, además de los dos integrantes probados. Sin embargo, hasta el 2016, no se habían descrito nuevas asociaciones estables. Uno de los ‘contaminantes’ que Spribille descubrió –una levadura unicelular– resultó ser algo más que un residente temporal. Se halla en líquenes de los seis continentes y puede hacer una aportación considerable a la fisiología de los líquenes como darles la apariencia de una especie totalmente diferente. Esta levadura era un tercer socio decisivo en la simbiosis.

El descubrimiento explosivo de Spribille solo fue el comienzo. Dos años más tarde, él y su equipo descubrieron que los líquenes de lobo –una de las especies más estudiadas– albergan incluso otra especie de hongos, un *cuarto* socio fúngico. La identidad de los líquenes se separaba en esquirlas más pequeñas si cabe. Aunque esto sigue siendo una simplificación excesiva, me dijo Spribille. «La situación es infinitamente más compleja. El ‘equipo básico’ de socios es diferente para cada grupo de líquenes. Algunos tienen más bacterias y otros, menos; algunos tienen una especie de levadura, algunos tienen dos, o ninguna. Y lo que es más interesante, todavía no hemos encontrado ningún liquen que coincida con la definición tradicional de hongo o alga».[44]

¿Lo que hacen los nuevos socios fúngicos en realidad lo *hacen* en el liquen? –le pregunté.

«Todavía no estamos seguros» –me contestó Spribille–. «Cada vez que vamos e intentamos averiguar quién hace qué, nos quedamos desconcertados. En lugar de descubrir los papeles de los integrantes, nos encontramos con más integrantes. Cuanto más profundizamos, más encontramos».

Los descubrimientos de Spribille son inquietantes para algunos investigadores porque ellos sugieren que la simbiosis de los líquenes no es tan «hermética» como se creía. «Hay gente que piensa que la simbiosis es como un paquete de IKEA –me explicó Spribille– con partes claramente identificadas y funciones e instrucciones sobre cómo montarlo». En su lugar, sus descubrimientos sugieren que un liquen podría estar formado por una amplia gama de integrantes diferentes que solo necesitan «estimularse entre sí de la

manera correcta». Es menos sobre la identidad de los «cantantes» en el liquen, y más sobre lo que hacen –la «canción» metabólica que cada uno de ellos canta–. Desde este punto de vista, los líquenes son *sistemas* dinámicos, en lugar de un catálogo de piezas que interactúan.

Es un escenario muy diferente al de la hipótesis dual. Desde la representación del hongo y del alga de Schwendener como amo y esclavo, los biólogos han discutido sobre cuál de los dos socios controla al otro. Pero ahora un dueto se ha convertido en trío, el trío se ha convertido en cuarteto, y el cuarteto suena más a coro. Spribille se muestra impasible ante el hecho que no se pueda dar una definición sencilla y estable de lo que el liquen es en realidad. Es un punto al que Goward suele volver, deleitándose en lo absurdo: «*¿Hay toda una disciplina que no puede definir qué es lo que estudian…?*». «Qué más da cómo los llames» –escribe Brenda Hillman sobre los líquenes–. «Algo tan radical y común simboliza algo». Durante más de cien años, los líquenes han representado muchas cosas y, seguramente, seguirán desafiando nuestra comprensión de lo que son los organismos vivos[45].

Y mientras tanto, Spribille persigue nuevos indicios prometedores. «Los líquenes están completamente infestados de bacterias» –me dijo–. De hecho, los líquenes albergan tantas bacterias que algunos investigadores tienen la hipótesis –en otro giro sobre la teoría de la panspermia– que actúan como depósitos de microbios que siembran en hábitats estériles con cepas bacterianas esenciales. Dentro de los líquenes, algunas bacterias producen defensas; otras crean vitaminas y hormonas. Pero Spribille sospecha que quizá hagan más. «Creo que algunas de estas bacterias podrían ser necesarias para sujetar el sistema de los líquenes permitiéndoles formar algo más que una masa amorfa en un plato».[46]

Spribille me contó lo de un artículo llamado «*Queer theory for lichens*» («es lo primero que aparece cuando buscas en Google ‘*queer*’ y ‘*lichen*’»). Su autor manifiesta que los líquenes son seres extraños *(queer)* que presentan formas para que los seres humanos piensen más allá de un rígido marco binario: la identidad de los líquenes es una pregunta, y no una respuesta que ya se conoce de antemano. Por su parte, Spribille ha hallado en la teoría extraña *(queer)* un marco útil para aplicar a los líquenes. «El punto de vista binario de los seres humanos ha hecho que sea difícil formular preguntas que no son binarias» –me explicó–. «Nuestras restricciones sobre sexualidad hacen que sea difícil formular preguntas sobre sexualidad, y demás. Preguntamos desde la perspectiva de

nuestro contexto cultural. Y esto hace muy difícil plantear preguntas sobre simbiosis complejas como los líquenes porque pensamos en nosotros mismos como individuos autónomos y de ahí que nos cueste vernos reflejados».[47]

Spribille describe los líquenes como la simbiosis más «extrovertida». Además, ya no es posible concebir ningún organismo –ni siquiera el ser humano– como diferente de las comunidades microbianas con las que comparten un cuerpo. La identidad biológica de la mayoría de organismos no puede ser valorada aparte de la vida de sus simbiontes microbianos. La palabra «ecología» viene del griego *oikos*, que significa «hogar», «casa» o «alojamiento». Nuestros cuerpos, como los del resto de organismos, son alojamientos. La vida son biomas alojados hasta lo más profundo.

No podemos ser definidos en términos anatómicos porque nuestros cuerpos están compartidos por microbios, y están formados por más células microbianas que por las nuestras «propias» –las vacas, por ejemplo, no pueden comer hierba pero sus poblaciones de microbios sí pueden, y los cuerpos de las vacas han evolucionado para alojar los microbios que las mantienen–. Tampoco podemos ser definidos en términos de desarrollo, como el organismo que procede de la fertilización de un huevo animal, porque dependemos, como todos los mamíferos, de nuestros socios simbióticos para dirigir partes de nuestros programas de desarrollo. Ni tampoco es posible definirnos en términos genéticos, como cuerpos formados por células que comparten un genoma idéntico –muchos de nuestros socios microbianos simbióticos los hemos heredado de nuestras madres junto con nuestro «propio» ADN, y en momentos de nuestra historia evolutiva, los microbios asociados se han introducido permanentemente en las células de sus huéspedes: nuestra mitocondria tiene su propio genoma, como hacen los cloroplastos de las plantas, y al menos el 8% del genoma humano procede de un virus (hasta podemos intercambiar células con otros seres humanos cuando nos transformamos en «quimeras», formadas cuando madres y fetos intercambian células o material genético *in utero*)–. Ni siquiera se pueden considerar los sistemas inmunitarios como una medida de individualidad, aunque a menudo se piensa en nuestras células inmunitarias como la respuesta que damos a esta cuestión para diferenciar el «uno mismo» del «otro». Los sistemas inmunitarios están tan preocupados por gestionar nuestras relaciones con nuestros microbios residentes como por combatir

atacantes externos, y parece que han evolucionado para permitir la colonización por microbios en lugar de prevenirla. ¿Dónde te deja esto?¿O quizá a todo tu ser?[48]

Algunos investigadores usan el término «holobionte» para referirse a una reunión de organismos diferentes que se comportan como una unidad. La palabra «holobionte» deriva del griego *holos* (todo). Holobiontes son los líquenes de este mundo, el más que la suma de sus partes. Como «simbiosis» y «ecología», «holobionte» es una palabra que tiene su utilidad. Si solo tenemos palabras que describen individuos autónomos con los límites claros, es fácil pensar que, en realidad, existen.[49]

El holobionte no es un concepto utópico. La colaboración siempre es una mezcla de competición y cooperación. Hay muchos ejemplos donde los intereses de todos los simbiontes no se alinean. Una especie bacteriana en nuestros intestinos puede ser una parte clave de nuestro sistema digestivo pero si entra en la sangre podría matarnos. Estamos acostumbrados a esta idea. Una familia puede funcionar como una familia, una banda de *jazz* en gira puede ofrecer un concierto cautivador, y aun así, ambos conviven con tensiones. [50]

Quizá, después de todo, no sea tan difícil para nosotros relacionarnos con líquenes. Este tipo de relación-construcción representa una de las máximas evolutivas más antiguas. Si la palabra «*cyborg*» –contracción de las palabras *cybernetic organism* (organismo cibernético)– describe la fusión entre un organismo vivo y una pieza de tecnología, entonces nosotros, como el resto de formas de vida, somos *symborgs*, o *symbiotic organisms* (organismos simbióticos). Los autores de un eminente artículo sobre la perspectiva simbiótica de la vida adoptan una posición clara sobre este punto. «Nunca ha habido individuos» –declaran–. «Todos somos líquenes».[51]

*

Navegando sin rumbo en el *Caper*, nos pasamos mucho tiempo mirando cartas náuticas. En estos mapas, los papeles del mar y de la tierra suelen estar invertidos. Las masas de tierra son extensiones beis, en blanco. El agua está llena de contornos e indicadores, que se arrugan alrededor de las rocas. Migajas de tierra anónimas repartidas entre canales marítimos que se ramifican y confluyen. El océano se mueve por la red de canales de forma impredecible. Solo se puede navegar por algunos pasos a ciertas horas del día. Cuando la marea se precipita

por un canal estrecho y peligroso, sus corrientes confluyen para crear una ola de 1,5 m que se queda quieta, una pared de agua que se aguanta sola. En un corredor especialmente traicionero entre dos islas, aparece un remolino de marea de 15 m y engulle los troncos que flotan.

Muchos de estos canales marítimos están acotados por rocas. Acantilados de granito que se precipitan al mar. Los árboles se ladean, cayendo a cámara lenta. A lo largo de la costa, las mareas baldean árboles, musgo y líquenes dejando al descubierto peñascos y salientes, muchos con arañazos de glaciares. Es difícil olvidar que buena parte de la tierra es roca sólida que se desmigaja poco a poco. Salientes desnivelados se imponen formando escarpados precipicios. Mi hermano y yo solemos pasar la noche en estas cornisas. Los líquenes están por doquier, y me despierto con la cara llena de líquenes. Pocos días después, aún encuentro fragmentos que se atrincheran en los bolsillos de mis pantalones. Los quito sintiéndome como un meteorito humano, y me pregunto de qué manera son capaces de crear una vida en lugares tan inesperados como el que están ahora.

# 4

# MENTES DE MICELIO

*Hay un mundo más allá… Ese mundo habla. Tiene su propio lenguaje. Verbalizo lo que dice. Las setas sagradas me toman de la mano y me llevan al mundo donde todo se sabe… Yo les pregunto y ellas me responden.*

**MARÍA SABINA**

En una escala del uno al cinco –el uno es «insuficiente» y el cinco, «intenso»–, ¿cómo calificarías la sensación de pérdida de tu identidad habitual? ¿Cómo calificarías tu experiencia como ser puro? ¿Cómo calificarías tu sensación de fusión en un todo más grande?

Tumbado en la cama de la unidad de ensayos clínicos con drogas, cuando mi ‘viaje’ con LSD tocaba a su fin, me planteaba estas cuestiones. Las paredes respiraban acompasadas, o eso me parecía, y me costaba concentrarme en las palabras de la pantalla. Sentía un suave hormigueo en el estómago, y los sauces del exterior se mecían, verdes y esplendorosos.

El LSD, como la psilocibina –el ingrediente activo de muchas especies de setas ‘mágicas’–, está clasificado como un psicodélico (o «que manifiesta el alma»), pero también como un enteógeno (una sustancia que provoca el «despertar de la conciencia divina»). Con efectos que abarcan desde alucinaciones auditivas y visuales y estados oníricos de euforia a fuertes cambios en la perspectiva cognitiva y emocional y a una disolución del tiempo y del espacio, estas sustancias químicas aflojan el entendimiento de nuestras percepciones cotidianas, llegan hasta nuestra conciencia y ahondan en nuestro ser. Muchos usuarios informan de experiencias místicas o de conexión con seres o entes divinos, una sensación de «unidad» con el mundo natural y de disolución de las fronteras de uno mismo.[1]

El test psicométrico que me esforzaba por completar se había diseñado para evaluar experiencias como esta. Pero cuanto más intentaba sintetizar mis sensaciones en una escala del uno al cinco, más desconcertado me quedaba.

¿Cómo puede uno medir la experiencia de la atemporalidad? ¿Cómo se puede medir la experiencia de unidad con una realidad absoluta? Son cualidades, no cantidades. Y aun así, la ciencia trabaja con cantidades.

Me moví nervioso en la cama, respiré hondo varias veces e intenté plantearme las preguntas desde otro prisma: *¿Cómo evalúas tu experiencia de asombro?* Me pareció que la cama se balanceaba un poco y una batería de pensamientos se dispersaba por mi mente como pececitos en desbandada. *¿Cómo evalúas tu experiencia de infinidad?* Pude notar cómo el método científico crujía bajo la presión de lo que parecía ser una tarea imposible. *¿Cómo calificas la pérdida del sentido del tiempo?* Me dio un ataque de risa incontrolable –un efecto habitual del LSD, ya me lo habían dicho en una evaluación previa de riesgos–. *¿Cómo calificas la pérdida de tu percepción normal sobre el lugar donde estás?*

Se me pasó el ataque de risa y miré al techo. Y de golpe se me ocurrió pensar en ¿cómo *había* acabado aquí? Un hongo se había transformado en una sustancia química con la que se elaboró una droga. Esta droga se había descubierto, casi por accidente, para alterar la experiencia humana. Durante unos 70 años, los peculiares efectos del LSD en nuestras mentes habían generado sorpresa, confusión, fervor evangélico, pánico moral y todo lo que hay entremedio. Como si hubiera empapado por completo el siglo XX, dejando un imborrable residuo cultural por el que aún nos esforzamos por encontrarle un sentido. Estaba tumbado en una cama de hospital como parte de un ensayo clínico porque sus efectos seguían siendo tan desconcertantes como siempre.

Con razón estaba desconcertado. El LSD y la psilocibina son moléculas fúngicas que se han visto enmarañadas en la vida humana en formas enrevesadas porque, precisamente ellas, confunden nuestros conceptos y estructuras, incluido el concepto más fundamental: el de nosotros mismos. Es su capacidad para colocar nuestras mentes en lugares inesperados lo que ha hecho que las setas ‘mágicas’ productoras de psilocibina vengan envueltas en doctrinas rituales y espirituales de sociedades humanas desde la Antigüedad. Es su capacidad para ablandar los rígidos hábitos de nuestras mentes la que convierte a estas sustancias químicas en potentes fármacos capaces de atenuar graves comportamientos adictivos, la depresión de otro modo incurable y la angustia existencial que puede seguir al diagnóstico de una enfermedad terminal. Y es su capacidad para modificar la experiencia interna de nuestras mentes la que ha ayudado a cambiar la manera de entender la verdadera naturaleza de la mente

dentro de los marcos científicos actuales. Aun así, el por qué determinadas especies de hongos desarrollaron estas aptitudes sigue siendo una fuente de desconcierto y especulación.

Me froté los ojos, me di la vuelta y me armé de valor para volver a mirar las palabras de la pantalla. *¿Cómo evalúas la sensación de que la experiencia no se puede describir adecuadamente con palabras?*

Los manipuladores más prolíficos e imaginativos del comportamiento animal son un grupo de hongos que viven en los cuerpos de los insectos. Estos 'hongos zombi' son capaces de modificar el comportamiento de su huésped sacando beneficio de él: al secuestrar un insecto, el hongo es capaz de dispersar sus esporas y completar su ciclo vital.

Uno de los casos más estudiados es el del hongo *Ophiocordyceps unilateralis*, que organiza su vida alrededor de las hormigas carpinteras. Una vez el hongo las infecta, las despoja de su miedo instintivo a las alturas y estas abandonan la seguridad relativa de sus hormigueros para subir a la planta más próxima –un síndrome conocido como «enfermedad de la cumbre»–. A su debido tiempo, el hongo obliga a la hormiga a anclarse con sus mandíbulas a la planta en un 'apretón mortal'. El micelio crece desde las patas de la hormiga y la cose a la superficie de la planta. Después el hongo devora el cuerpo del animal y hace que brote un tallo de su cabeza, cuyas esporas caen sobre las hormigas que pasan por debajo. Si las esporas no alcanzan a sus objetivos, producen esporas secundarias adhesivas que se expanden hacia fuera a modo de hilos trampa.[2]

Los hongos zombi controlan el comportamiento de sus insectos huésped con exquisita precisión. El *Ophiocordyceps* obliga a las hormigas a ejecutar el apretón mortal en una zona con la temperatura y humedad adecuadas para que el hongo pueda fructificar: a unos 25 cm del suelo del bosque. El hongo orienta a las hormigas según la dirección del sol, y las hormigas infectadas muerden en concordancia, al mediodía, y no cualquier parte vieja del envés de la hoja. El 98% de las veces, las hormigas se aprietan a una nervadura principal.[3]

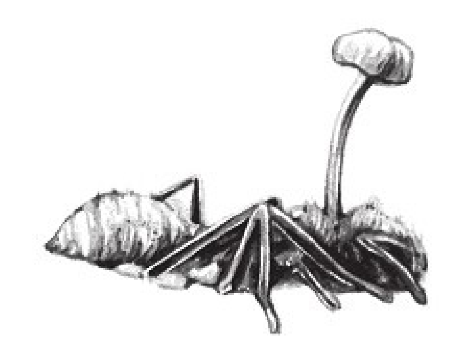
Cómo los hongos zombi pueden controlar las mentes de sus insectos huésped es algo que hace mucho tiempo tiene desconcertados a los investigadores. En el 2017, un equipo encabezado por David Hughes, un destacado experto en comportamientos manipuladores de los hongos, infectó hormigas con *Ophiocordyceps* en el laboratorio. Los investigadores conservaron

los cuerpos de las hormigas en el momento de su mordedura mortal, los cortaron en finos trozos y reconstruyeron una imagen tridimensional del hongo viviendo dentro de sus tejidos. Descubrieron que el hongo se convierte, hasta un grado perturbador, en un órgano protésico de las hormigas. Hasta el 40% de la biomasa de la hormiga infectada es hongo. Las hifas invaden sinuosas sus cavidades corporales, de la cabeza a las patas, se enredan en sus fibras musculares y coordinan su actividad vía una red interconectada de micelio. No obstante, es muy curioso pero el hongo no está en los cerebros de las hormigas. Hughes y su equipo no se lo esperaban. Vaticinaron que el hongo tendría que estar presente en el cerebro para controlar con semejante precisión el comportamiento de las hormigas.[4]

En su lugar, la posesión del hongo parece ser farmacológica. Los investigadores sospechan que el hongo puede mover los hilos de los movimientos de las hormigas al secretar sustancias químicas que actúan en sus músculos y en su sistema nervioso central sin estar presente físicamente en sus cerebros. No se sabe exactamente de qué sustancias químicas se trata. Ni se sabe si el hongo es capaz de amputar el cerebro de la hormiga de su cuerpo y coordinar las contracciones de sus músculos directamente. Sin embargo, el *Ophiocordyceps* está íntimamente relacionado con los cornezuelos de los que el químico suizo Albert Hofmann inicialmente aisló los compuestos usados para elaborar LSD, y es capaz de producir la familia de sustancias químicas de la que sale el LSD –un grupo conocido como «alcaloides ergóticos»–. Dentro de las hormigas infectadas, las partes del genoma *Ophiocordyceps*, responsable de la producción de estos alcaloides, están activadas, dando a entender que podrían tener un papel importante en la manipulación del comportamiento de la hormiga.[5]

Independientemente de cómo lo hagan, estas intervenciones de los hongos son extraordinarias desde cualquier punto de vista humano. Tras décadas de investigación, y miles de millones de dólares invertidos, la capacidad para controlar el comportamiento humano mediante drogas es cualquier cosa menos ajustada. Los fármacos antipsicóticos, por ejemplo, no se dirigen a comportamientos específicos; solo tranquilizan. Compárese esto con el 98% del éxito del *Ophiocordyceps* cuando obliga a la hormiga no solo a subir o a ejecutar su mordedura mortal –ambos siempre ocurrensino a morder una parte específica de la hoja con las mejores condiciones para que el hongo fructifique. Pero hay que ser justos, el *Ophiocordyceps*, como un gran número de hongos zombi, ha

tenido mucho tiempo para pulir sus métodos. Los comportamientos de las hormigas infectadas no pasan sin dejar rastro. El apretón mortal de estos insectos dejan características cicatrices en las nervaduras de las hojas, y las marcas fosilizadas nos permiten retroceder a los orígenes de este comportamiento, a la época del Eoceno, hace 48 millones de años. Probablemente los hongos hayan estado manipulando las mentes de los animales durante buena parte del tiempo que ha habido mentes para manipular.[6]



***Ophiocordyceps* brotando de una hormiga.**

Tenía 7 años cuando descubrí que los seres humanos podían alterar sus mentes al comer otros organismos. Nuestros padres nos llevaron a mi hermano y a mí a Hawái y nos hospedamos con un amigo suyo, el excéntrico escritor, filósofo y etnobotánico Terence McKenna. Su mayor pasión eran las plantas y hongos que alteraban los estados de conciencia. Había sido traficante de hachís en Bombay, coleccionista en Indonesia y cultivador de setas psilocibinas en el norte de California. Ahora vivía en un refugio inaudito llamado Botanical Dimensions, varios kilómetros cuesta arriba por una carretera accidentada en las laderas del volcán Mauna Loa. Había creado un jardín forestal donde cultivaba una biblioteca viva de plantas medicinales psicoactivas, insólitas o no tan insólitas, de muchos rincones del mundo tropical. Para llegar al retrete exterior, uno tenía que caminar por una sinuosa senda a través del bosque, agachándose bajo hojas y lianas que goteaban. A pocos kilómetros bajando por la carretera, corrientes de lava se vertían en el mar, que espumaba y hervía.

McKenna se reservaba su mayor entusiasmo para las setas psilocibinas. Las probó por primera vez cuando viajaba por la Amazonia colombiana con su hermano Dennis a principios de la década de 1970. En años posteriores, empujado por ‘valientes’ ingestas regulares de setas, McKenna descubrió un don

insólito para charlar y comunicarse en público. «Me di cuenta de que mi capacidad irlandesa innata se había potenciado sobremanera tras años de consumo de setas psilocibinas –recordaba–. Podía hablar a pequeños grupos de personas causando un efecto aparentemente electrizante sobre… temas excepcionalmente trascendentales.» Las reflexiones bárdicas de McKenna –elocuentes y muy difundidas– se siguen agradeciendo y denunciando, más o menos, en igual medida.[7]

A los pocos días de estar en el Botanical Dimensions, me puse enfermo, con fiebre. Me acuerdo de estar tumbado debajo de una mosquitera, viendo a McKenna pulverizando un preparado con una gran mano de mortero y un mortero. Asumí que era un remedio para mi malestar y le pregunté qué hacía. Con su parsimoniosa voz metálica y alocada, me explicó que no era tal cosa. Esta planta, como algunas setas, podía hacernos soñar. Y con suerte, estos organismos podían incluso hablarnos. Eran medicinas fuertes que los seres humanos habían utilizado desde tiempos inmemoriales pero también podían asustar. Esbozó una lánguida sonrisa. Cuando yo fuera mayor, me decía, podría probar algunos de los preparados –un hermano de la salvia que alteraba el estado de conciencia llamado *salvia divinorum*, tal y como se presentó–. Pero en ese momento no. Me quedé muy intrigado.

Existen muchos ejemplos de intoxicación en el mundo animal –aves que comen bayas embriagadoras, lémures que lamen milpiés, polillas que beben el néctar de flores psicoativas, etc.– y probablemente hayamos usado drogas que alteran el estado de conciencia desde hace más tiempo del que venimos siendo humanos. Los efectos de estas sustancias son «frecuentemente inexplicables y, a todas luces, asombrosas», escribió Richard Evans Schultes, un profesor de biología en Harvard y una autoridad destacada en plantas y hongos psicoactivos. «Sin duda, (estos compuestos) se han conocido y empleado en experiencias humanas desde que el hombre primitivo experimentara con la vegetación de su entorno.» Muchos tienen efectos «extraños, místicos y desconcertantes» y, como las setas psilocibinas, están íntimamente ligadas a las culturas humanas y prácticas espirituales.[8]

Bastantes hongos tienen propiedades que alteran los estados de conciencia. La *Amanita muscaria*, la icónica seta roja con topos blancos que comían los chamanes en zonas de Siberia, provoca euforia y sueños alucinatorios. Los cornezuelos causan una horripilante lista de efectos, desde alucinaciones y convulsiones a una sensación de ardor insoportable. El tic involuntario de los

músculos es uno de los principales síntomas del ergotismo, y la capacidad de los alcaloides ergóticos para provocar contracciones musculares en seres humanos puede ser un reflejo de su papel en hormigas infectadas por *Ophiocordyceps*. Bastantes de los horrores plasmados por el pintor renacentista el Bosco se cree que están inspirados en los síntomas de ergotismo por cornezuelo, y hay quien teoriza que los numerosos brotes del «baile de San Vito» que aparecieron entre los siglos XIV y XVII, en los que cientos de aldeanos bailaban durante días sin descanso, fueron provocados por ergotismo colvulsivo.[9]

México es el país con el empleo de setas mejor documentado desde hace más tiempo. El fraile dominico Diego Durán informó que durante la coronación del emperador azteca en 1486 se sirvieron setas que alteran estados de conciencia –conocidas como «carne de los dioses»–. El Dr. Francisco Hernández, protomédico del rey de España, describió setas que «cuando se ingieren causan no la muerte sino una locura que, en ocasiones, es duradera, y cuyo síntoma es una especie de ataque de risa incontrolable […]. Hay otras que traen ante sus ojos visiones de todo tipo, tales como guerras e imágenes del demonio». El fraile franciscano Bernardino de Sahagún (1499-1590) aportó una de las crónicas más gráficas sobre el consumo de setas:[10]

> Se comieron estas pequeñas setas con miel, y cuando empezaron a estar alterados, se pusieron a bailar, algunos a cantar, otros a llorar […]. Algunos no querían cantar pero se sentaron en sus aposentos y allí se quedaron como en estado contemplativo. Algunos se vieron a sí mismos muriéndose en una visión y lloraban; otros se vieron siendo devorados por una bestia salvaje […]. Cuando la intoxicación por las pequeñas setas había pasado, comentaron las visiones que habían tenido.

Hay documentos inequívocos de consumo de setas en Centroamérica que se remontan al siglo XV, pero la utilización de setas psilocibinas en la región es anterior a ese siglo casi con total certeza. Se han descubierto centenares de estatuas fungiformes que datan del ii milenio a.C., y códices precolombinos muestran imágenes de deidades emplumadas ingiriendo setas y levitando.[11]

Según McKenna, el consumo humano de setas psilocibinas es un fenómeno incluso más antiguo, si cabe, y reside en las raíces de la evolución biológica, cultural y espiritual del ser humano. Los indicios de religión, organización social compleja y comercio, así como las manifestaciones artísticas más tempranas, aparecieronn hace relativamente poco en la historia de los seres humanos, entre 50000 y 70000 años atrás. Se desconoce lo que desencadenó estos avances. Algunos eruditos lo atribuyen a la invención del lenguaje complejo. Otros tienen

la hipótesis de que las mutaciones genéticas trajeron cambios en la estructura cerebral. Para McKenna, fueron las setas psilocibinas las que prendieron los primeros destellos de introspección, lenguaje y espiritualidad, en algún lugar en la niebla protocultural del Paleolítico. Las setas fueron el árbol original del conocimiento.

Las pinturas rupestres conservadas gracias al calor seco del desierto del Sáhara, al sur de Argelia, dieron a McKenna la pruebas más impresionante de que el hombre primitivo consumía setas. Las pinturas rupestres de Tassili (9000-7000 a.C.) incluyen la figura de una divinidad con cabeza de animal y brotes fungiformes que salen de sus hombros y brazos. Mientras nuestros antepasados recorrían las «praderas y sabanas espolvoreadas por setas del África tropical y subtropical –conjeturó McKenna–, se encontraban setas psilocibinas, las consumían y las divinizaban. El lenguaje, la poesía, los ritos y el pensamiento salieron de la oscuridad de la mente homínida».[12]

Hay muchas variaciones sobre la hipótesis del mono ebrio pero, como pasa siempre en las versiones sobre los orígenes, es difícil demostrarlas. No escasean, precisamente, las especulaciones sobre dónde se han consumido setas psilocibinas. Los textos y objetos que han sobrevivido son incompletos, y casi siempre ambiguos. ¿Representa la pintura de Tassili una divinidad de seta? Podría ser que sí, o que no. La prueba de la placa dental de un neandertal, el «Hombre de Hielo» y otros cuerpos bien conservados demuestran que el ser humano comía setas y las usaba como remedios medicinales hace muchos miles de años. Sin embargo, no se han encontrado restos de setas psilocibinas en ninguno de estos cuerpos. Se sabe que varias especies de primates buscan y comen hongos, y hay casos anecdóticos de primates que consumen setas psilocibinas pero no son ejemplos bien documentados. Hay quien sospecha que ancestrales poblaciones euroasiáticas consumían setas psilocibinas en ceremonias religiosas, a destacar los Misterios Eleusinios, ritos herméticos celebrados en la Antigua Grecia y a los que presumiblemente asistían muchas lumbreras, incluido Platón. Pero una vez más no hay ni un documento que lo demuestre. Y al final, como siempre, la ausencia de pruebas no aporta la prueba de ausencia. Y esto hace inevitables las especulaciones. Y McKenna, sobreexcitado por la psilocibina, fue un maestro de este arte.[13]

El *Ophiocordyceps* ha servido de inspiración, como mínimo, para crear dos monstruos de ficción: los caníbales en el videojuego *The Last of Us* y los zombis en el libro *Melanie: una novela de zombis*. Suena a caso especial, extraño pero cierto –una de las consecuencias inauditas de la evolución–. Sin embargo, el *Ophiocordyceps* no es más que un ejemplo bien estudiado. Este tipo de comportamiento manipulador no es excepcional. Ha evolucionado muchas veces en el reino de los hongos en linajes sin parentesco, y hay muchos parásitos que, sin ser hongos, también son capaces de manipular las mentes de sus huéspedes.[14]

Los hongos se acercan de formas muy distintas a sus huéspedes para modificar los diales biomecánicos que regulan su comportamiento. Algunos utilizan inmunosupresores para anular las respuestas defensivas de los insectos. Dos de dichos compuestos han logrado trascender a la medicina convencional precisamente por estas razones. La ciclosporina es un fármaco inmunodepresor que permite llevar a cabo trasplantes de órganos. La miriocina se ha convertido en el fármaco fingolimod superventas para tratar la esclerosis múltiple y fue inicialmente extraído de avispas infestadas de hongo que se comen en zonas de China como panacea para la eterna juventud.[15]



***Psilocybe cubensis.***

En el 2018, investigadores de la Universidad de California, en Berkeley, publicaron un estudio que documentaba una sorprendente técnica utilizada por el *Entomophthora*, un hongo manipulador de mentes que infecta las moscas y que guarda ciertos paralelismos con el *Ophiocordyceps*. Las moscas infectadas suben a cierta altura. Cuando extienden sus piezas bucales para alimentarse, un pegamento producido por el hongo las engancha a cualquier superficie que

toquen. Cuando el hongo ha devorado el cuerpo de la mosca, empezando por las partes grasas y acabando por los órganos vitales, hace brotar un tallo por el abdomen del animal y expulsa esporas al aire.

Los investigadores se sorprendieron al descubrir que el hongo *Entomophthora* lleva consigo un tipo de virus que infecta insectos, no a hongos. El máximo responsable del estudio reveló que era «uno de los descubrimientos más disparatados» de su carrera científica. Lo que es disparatada es la implicación: que el hongo utilice el virus para manipular la mente de los insectos. Aún es una hipótesis, pero es plausible. Bastantes virus afines se especializan en modificar el comportamiento del insecto. Uno de dichos virus lo inyectan las avispas con el parásito a las mariquitas, que tiemblan, permanecen inmóviles en el sitio y se convierten en guardianas de los huevos de las avispas. Otro virus similar hace a las abejas más agresivas. Al emplear un virus manipulador de mentes, el hongo no habría desarrollado la capacidad de modificar la mente de su insecto huésped.[16]

Uno de los giros más sorprendentes en la historia de los hongos zombi vino de la investigación llevada a cabo por Matt Kasson y su equipo de la Universidad de Virginia Occidental. Kasson estudia el hongo *Massospora*, que infecta cigarras y desintegra un tercio de la parte posterior de sus cuerpos por los que secreta sus esporas. Las cigarras macho infectadas –«saleros voladores de la muerte», según Kasson– se hiperactivan e hipersexualizan pese a haber perdido sus genitales hace tiempo, una prueba de lo sabiamente que el hongo actúa para manejar su deterioro. Sus sistemas nerviosos centrales permanecen intactos en un cuerpo en descomposición.[17]

En el 2018, Kasson y su equipo analizaron el perfil químico de los ‘enchufes’ del hongo que brotan de los cuerpos rotos de las cigarras. Se sorprendieron al descubrir que el hongo producía catinona, una anfetamina de la misma clase que la droga recreativa mefedrona. La catinona se da de forma natural en las hojas de *khat (Catha edulis)*, una planta cultivada en el Cuerno de África y Oriente Medio que ha sido masticada por humanos durante siglos por sus efectos estimulantes. Hasta entonces no se había descubierto catinona fuera de las plantas. Más asombroso fue la presencia de psilocibina, que era una de las sustancias químicas que abundaban más en los enchufes fúngicos –aunque uno tendría que comerse centenares de cigarras infectadas para notar algún efecto–. Es sorprendente porque el *Massospora* está en una división del reino de los hongos totalmente diferente a las especies conocidas por producir psilocibina,

separado por un abismo de cientos de millones de años. Pocos sospechaban que la psilocibina aparecería en una parte tan distante del árbol evolutivo de los hongos, ejerciendo un papel modificador de comportamiento en un contexto tan diferente.[18]

¿Qué pretende hacer exactamente el *Massospora* intoxicando a sus huéspedes con un psicodélico y una anfetamina? Los investigadores suponen que estas sustancias colaboran en la manipulación fúngica del insecto. Pero se desconoce exactamente cómo.[19]

Quienes relatan experiencias psicodélicas a menudo incluyen a seres híbridos y transformaciones entre especies. También los mitos y cuentos de hadas están trufados de animales compuestos, desde hombres lobo a centauros, esfinges y quimeras. *Las metamorfosis* de Ovidio es un catálogo de transformaciones de una criatura a otra, e incluso incluye una tierra donde «hombres nacen de un hongo de lluvias torrenciales». En muchas culturas tradicionales se piensa que las criaturas compuestas existen y que los límites entre organismos son fluidos. El antropólogo Eduardo Viveiros de Castro revela que los chamanes de sociedades indígenas amazónicas creen que ellos pueden residir temporalmente en la mente y cuerpo de otros animales y plantas. Entre el pueblo yukaguir del norte de Siberia, escribe el antropólogo Rane Willerslev, los humanos se visten y comportan como uapitíes cuando cazan uapitíes.[20]

Estos relatos parecen estirar los límites de la posibilidad biológica y raras veces se toman en serio en los círculos científicos actuales. Sin embargo, el estudio de la simbiosis revela que hay muchas formas de vida híbridas, como los líquenes, compuestos por varios organismos diferentes. Claro, todas las plantas, hongos y animales, también nosotros, son, de alguna manera, seres compuestos: las células eucariotas son híbridos, y todos compartimos cuerpo con infinidad de microbios sin los que no podríamos crecer, ni comportarnos, ni reproducirnos como lo hacemos. Es posible que muchos de estos microbios 'beneficiosos' compartan algunas de las capacidades manipuladoras de parásitos como el *Ophiocordyceps*. Cada vez hay más estudios que establecen un vínculo entre el comportamiento animal y los miles de millones de bacterias y hongos que viven en sus intestinos, muchos de los cuales producen sustancias químicas que influyen en los sistemas nerviosos animales. La interacción entre la flora intestinal y el cerebro –el «eje microbioma-intestino-cerebro»– tiene tal

envergadura que ha dado a luz a un nuevo campo: la neuromicrobiología. Sin embargo, los hongos manipuladores de la mente siguen siendo uno de los organismos compuestos más espectaculares. En palabras de David Hughes, una hormiga infectada es un «hongo con ropa de hormiga».[21]

Es posible encontrarle un sentido a este tipo de metamorfosis dentro del marco científico. En *El fenotipo extendido,* Richard Dawkins señala que los genes no solo facilitan las instrucciones para construir el cuerpo de un organismo; también aportan instrucciones para construir ciertos comportamientos. El nido de un ave es parte de la manifestación visible del genoma del ave. Una presa de castor es parte de la manifestación visible de un genoma de castor. Y el apretón mortal de una hormiga es parte de la manifestación visible del genoma de los hongos *Ophiocordyceps*. Mediante los comportamientos heredados, razona Dawkins, la manifestación visible de los genes de un organismo –su fenotipo– se extiende al mundo.

Dawkins fue cuidadoso en colocar «requisitos estrictos» en la idea del fenotipo extendido. Aunque es un concepto especulativo, nos recuerda diligentemente, es una «especulación firmemente limitada». Hay tres criterios esenciales que han de cumplirse para prevenir que los fenotipos se extiendan *demasiado* (si la presa de un castor es una manifestación del genoma del castor, ¿qué pasa entonces con el estanque que se forma río arriba, los peces que habitan en el estanque, y…?).[22]

El primer criterio es que los atributos extendidos deben ser heredados –el *Ophiocordyceps*, por ejemplo, hereda un talento farmacológico para infectar y manipular hormigas–. El segundo, que los atributos extendidos deben variar de una generación a otra –algunos *Ophiocordyceps* son manipuladores más precisos del comportamiento de la hormiga que otros–. Y el tercero, y el más importante, que la variación debe afectar la capacidad de un organismo para sobrevivir y reproducirse, una cualidad conocida como su «aptitud» –los *Ophiocordyceps* que pueden controlar de forma más precisa los movimientos de su insecto están mejor capacitados para esparcir sus esporas–. Siempre que se den estas tres condiciones –los atributos deben ser heredados, deben variar y su variación debe afectar a la aptitud de un organismo–, las características extendidas estarán sujetas a la selección natural y se desarrollarán de forma análoga a sus características corporales. Los castores que hacen las mejores presas son mejores candidatos a sobrevivir y a legar la capacidad para hacer mejores presas. Pero las presas humanas –o, para el caso, cualquier construcción humana– no cuentan

como parte de nuestro fenotipo extendido porque no hemos nacido con un instinto para construir estructuras específicas que afectan directamente a nuestra aptitud.

La enfermedad de la cumbre y el apretón mortal, por otro lado, cumplen totalmente los requisitos del comportamiento de hongos, y no del de las hormigas. El hongo no tiene un cuerpo animal, con nervios y músculos, con un sistema nervioso central o una capacidad para caminar, morder o volar. Así es que requisa uno. Es una estrategia que funciona tan bien que ha perdido la capacidad para sobrevivir sin él. Durante parte de su vida, el *Ophiocordyceps* debe vestirse con el cuerpo de una hormiga. En los círculos espiritistas del siglo XIX, se sobreentendía que los médiums pasaban a ser poseídos por los espíritus de los muertos. Se decía que los espíritus, despojados de sus propios cuerpos y voces, tomaban prestado un cuerpo humano para hablar y manifestarse a través de él. De una manera análoga, los hongos manipuladores de mentes poseen a los insectos que infectan. Las hormigas infectadas dejan de comportarse como hormigas y pasan a ser médiums de los hongos. Es en este sentido que Hughes se refería a una hormiga infectada con *Ophiocordyceps* como un hongo con ropa de hormiga. Alterada por el hongo, la hormiga se desvía de las vías de su propia historia evolutiva –vías que guían sus comportamientos y relaciones con el mundo y con otras hormigas– y entra en las vías de la historia evolutiva del *Ophiocordyceps*. En términos fisiológicos, conductuales y evolutivos, la hormiga *se convierte en un hongo*.

El *Ophiocordyceps* y otros hongos manipuladores de insectos han desarrollado una capacidad notable para hacer daño a los animales en los que influyen. Las setas psilocibinas, como asegura un número creciente de estudios, han desarrollado una increíble capacidad para curar un sinfín de patologías humanas. En un sentido, esto es nuevo: desde la primera década del siglo XXI, ensayos rigurosamente controlados y las últimas técnicas de escaneo cerebral han ayudado a los investigadores a interpretar experiencias psicodélicas utilizando el lenguaje de la ciencia moderna –fue esta nueva ola de investigación psicodélica la que me trajo al hospital para el estudio del LSD–. Estos descubrimientos recientes han confirmado ampliamente las opiniones de muchos investigadores de las décadas de 1950 y 1960, quienes llegaron a considerar el LSD y la psilocibina como curas milagrosas para un amplio abanico de patologías

psiquiátricas. En otro sentido, casi todas las investigaciones llevadas a cabo en contextos científicos actuales confirman, *a grosso modo*, lo que ya saben desde tiempos inmemoriales las culturas tradicionales que han utilizado plantas y hongos psicoactivos como medicinas y herramientas psico-espirituales. Desde este punto de vista, la ciencia moderna solo se está poniendo al día.[23]

Muchos descubrimientos recientes son extraordinarios para los estándares de las intervenciones convencionales con fármacos. En el 2016, dos estudios hermanados en la Universidad de Nueva York y la Universidad Johns Hopkins administraron psilocibina junto a un curso de psicoterapia a pacientes que sufrían de ansiedad, depresión y «angustia existencial» tras ser diagnosticados de cáncer terminal. Después de una sola dosis de psilocibina, el 80% de pacientes redujo considerablemente sus síntomas psicológicos durante, al menos, seis meses después de la toma. La psilocibina redujo la «desmoralización y la desesperanza, mejoró el bienestar espiritual y aumentó la calidad de vida». Los participantes describieron «sentimientos exaltados de alegría, felicidad y amor», y «un cambio de los sentimientos de separación a los de interconexión». Más del 70% de los participantes calificaron sus experiencias como una de las cinco vivencias más plenas de sus vidas. «Y podrías decir: ¿Qué significa eso? –remarcó en una entrevista Roland Griffiths, un veterano investigador del estudio–. Al principio me planteé que quizá habían tenido unas vidas aburridas. Pero no.» Los participantes compararon la experiencia con el nacimiento de su primer hijo o la muerte de un progenitor. Se consideran estos estudios como una de las intervenciones psiquiátricas más efectivas en la historia de la medicina contemporánea.[24]

Los cambios profundos en la mente y la personalidad de las personas son poco frecuentes; que sucedieran durante una experiencia corta resulta sorprendente. Sin embargo, tampoco son descubrimientos anómalos. Varios estudios recientes revelan los efectos espectaculares de la psilocibina en las mentes, actitudes y perspectivas de las personas. Al emplear algunos de los test psicométricos con los que yo tuve que lidiar, muchos de estos estudios han descubierto que la psilocibina puede inducir de forma fiable a experiencias ‘místicas’ derivadas de sentimientos de asombro: de que todo está interconectado; de estar por encima del tiempo y el espacio; de una profunda comprensión instintiva de la naturaleza de la realidad; y de un amor, una paz o una alegría sentidos en profundidad. A menudo incluyen la disolución de las fronteras definidas de uno mismo.[25]

La psilocibina puede dejar una impresión duradera en la mente de las personas, como la sonrisa del Gato de Cheshire en *Alicia en el País de las Maravillas*, que «permaneció un tiempo después de que el gato hubiera desaparecido». En un estudio, los investigadores descubrieron que una única dosis alta de psilocibina aumentaba la abertura a nuevas experiencias, el bienestar psicológico y la satisfacción de la vida de voluntarios sanos, un cambio que, en la mayoría de casos, duró más de un año. Algunos estudios han descubierto que las experiencias con psilocibina han ayudado a fumadores y alcohólicos a resolver su adicción. Otros estudios han informado de una mayor sensación duradera de conexión del sujeto con el mundo natural.[26]

De la nueva hornada de investigaciones sobre psilocibina empiezan a surgir algunos temas. Uno de los más interesantes es la manera como los participantes de los ensayos interpretan sus experiencias. Tal y como dice Michael Pollan en *Cómo cambiar tu mente*, la mayoría de personas que toma psilocibina no interpreta sus experiencias en términos mecánicos de biología moderna, de desplazamiento molecular por sus cerebros. Más bien al contrario. Pollan descubrió que muchos de los entrevistados habían «empezado siendo tremendamente materialistas o ateos […] y, aun así, varios habían tenido 'experiencias místicas' que les dejaron con la sólida convicción de que había algo más de lo que sabíamos, un 'más allá' de algún tipo que trasciende el universo físico». Estos efectos plantean una incógnita. Que una sustancia química puede provocar una experiencia mística profunda parece apoyar la visión científica predominante de que nuestros mundos subjetivos están apuntalados por la actividad química de nuestro cerebro; que el mundo de creencias espirituales y la experiencia de lo divino pueden aparecer a raíz de un fenómeno material, bioquímico. No obstante, y así lo señala Pollan, las experiencias propiamente dichas son tan fuertes que convencen a las personas que existe una realidad no material –la materia prima de la convicción religiosa.[27]

El *Ophiocordyceps* y la flora intestinal influyen en las mentes animales porque viven en sus cuerpos, ajustando sus secreciones químicas en tiempo real. Pero con las setas psilocibinas no pasa lo mismo. Uno puede inyectar psilocibina sintética a una persona y desencadenar toda suerte de efectos psico-espirituales, pero, ¿cómo funciona?

Una vez ya en el cuerpo, la psilocibina se convierte en psilocina química. La psilocina engrasa los mecanismos del cerebro estimulando los receptores que normalmente estimulaba la serotonina neurotransmisora. Al imitar uno de los mensajeros químicos que utilizamos más, la psilocibina, como el LSD, se infiltra en nuestro sistema nervioso, se interpone directamente en el paso de señales eléctricas que circulan por nuestro cuerpo, e incluso puede cambiar el crecimiento y estructura de las neuronas.[28]

De qué manera exactamente la psilocibina cambia los patrones de la actividad neuronal no se supo hasta finales de la década del 2000, cuando investigadores del Beckley/Imperial Psychedelic Research Program suministraron psilocibina a pacientes y monitorizaron su actividad cerebral. Sus descubrimientos fueron sorprendentes. Los escaneos revelaron que la psilocibina, dados los espectaculares efectos en la mente y la cognición de las personas, no aumentaba la actividad cerebral como cabría esperar sino que reducía dicha actividad en ciertas zonas clave.

El tipo de actividad cerebral reducida por psilocibina forma la base de lo que ha pasado a llamarse «red neuronal por defecto» (RND). Cuando no estamos concentrados en nada, cuando nuestra mente divaga distraídamente, cuando estamos introspectivos, cuando pensamos en el pasado o hacemos planes para el futuro, es nuestra RND la que está activa. Los investigadores han descrito la RND como la «ciudad capital» o el «ejecutivo corporativo» del cerebro. En el desorden de los procesos cerebrales que ocurren en todo momento, la RND es la que mantiene el orden –como un profesor en un aula caótica.

El estudio mostró que los sujetos que informaron de la sensación más intensa de «disolución del ego», o de pérdida del sentido de uno mismo bajo los efectos de la psilocibina, redujeron más la actividad de su RND. Si se cierra la RND, el cerebro se suelta. La conectividad cerebral se dispara y aparece un tumulto de nuevas vías neuronales. Las redes de actividad antes distantes se comunican. En palabras de la metáfora empleada por Aldous Huxley en su influyente análisis de la experiencia psicodélica, *Las puertas de la percepción*, la psilocibina parece que cierra una «válvula reductora» en nuestra conciencia ¿El resultado? Un «estilo libre de conocimiento». Los autores concluyen que la capacidad de la psilocibina para cambiar la mente de las personas está relacionada con estos estados de flujo cerebral.[29]

Los estudios con neuroimágenes aportan una buena descripción de cómo los psicodélicos actúan en nuestro cuerpo, pero no hacen mucho por explicar los

sentimientos de los participantes. Después de todo, es la persona la que tiene experiencias, no el cerebro. Y son precisamente esas experiencias las que parecen apuntalar los efectos terapéuticos de la psilocibina. En los estudios que midieron los efectos de la psilocibina en pacientes terminales de cáncer, quienes tuvieron las experiencias místicas más intensas fueron quienes redujeron más drásticamente patologías como la depresión y la ansiedad. De manera similar, en un estudio sobre psilocibina y adicción al tabaco, los pacientes con los mejores resultados fueron aquellos que habían vivido las experiencias místicas más potentes. Al parecer, la psilocibina hace efecto no al apretar un cuadro de botones biomecánicos sino al abrir las mentes de los pacientes a nuevas formas de pensar sobre sus vidas y comportamientos.

Es un descubrimiento que se hace eco en gran parte de la primera hornada de investigación psicodélica moderna con LSD y psilobicina de mediados del siglo XX. Abram Hoffer, un psiquiatra canadiense que investigaba los efectos del LSD en la década de 1950, remarcó que «desde el principio, tuvimos en cuenta no la sustancia química sino la experiencia como un factor clave en la terapia». Quizá ahora suene lógico, pero desde el punto de vista de la medicina mecanicista de la época fue una idea revolucionaria. La aproximación convencional era –y sigue siendo en gran medida– utilizar *material*, ya sean drogas o un instrumento quirúrgico, para tratar el *material* del que está hecho el cuerpo, de la misma manera que utilizamos herramientas para reparar una máquina. Normalmente se sobreentiende que las drogas pasan por un circuito farmacológico que rodea totalmente la mente consciente: una droga afecta a un receptor, que desencadena un cambio en la patología. En cambio, la psilocibina –como el LSD y otras drogas psicodélicas– parece que actúa en síntomas de enfermedad mental *vía la mente*. El circuito estándar se ensancha: una droga afecta a un receptor, que desata un cambio mental, que desata un cambio de síntomas. Las experiencias psicodélicas de los pacientes parecen ser, por sí mismas, la cura.[30]

En palabras de Matthew Johnson, un psiquiatra e investigador de la Johns Hopkins, las drogas psicodélicas como la psilocibina «dopan y sacan de un tortazo a la gente de su historia. Es, en sentido literal, como reiniciar el sistema [...]. Las drogas psicodélicas abren una ventana de flexibilidad mental donde la gente puede deshacerse de los modelos mentales que utilizamos para organizar la realidad». Los hábitos más curtidos, como los que crean adicción a una sustancia, o los que se suman al ‘pesimismo rígido’ de la depresión, pasan a ser

más maleables. Al ablandar las categorías que organizan la experiencia humana, la psilocibina y otros psicodélicos son capaces de abrir nuevas posibilidades cognitivas.[31]

Uno de los modelos mentales más irreductibles es el del *ego*. Es precisamente esta sensación del uno mismo la que la psilocibina y otros psicodélicos parecen alterar. Algunos lo llaman disolución del ego. Otros sencillamente dicen que perdieron el rastro de dónde terminan ellos y dónde empieza su entorno. El muy defendido «yo» del que tanto dependen los seres humanos puede desaparecer completamente, o solo reducirse, degradándose poco a poco hasta convertirse en otredad. ¿El resultado? Las sensaciones de fusión con algo superior, y una sensación reimaginada de la relación de uno con el mundo.[32] En muchos casos –desde los líquenes al comportamiento expansivo del micelio–, los hongos retan nuestros desgastados conceptos de identidad e individualidad. Las setas que producen psilocibina, como el LSD, también lo hacen, pero en el marco más íntimo posible: dentro de nuestra propia mente.

En el caso del *Ophiocordyceps*, se puede pensar en el comportamiento de una hormiga infectada como el comportamiento del hongo. El apretón mortal y la enfermedad de la cumbre son características extendidas del hongo, parte de su fenotipo extendido. ¿Se puede pensar en las alteraciones en la conciencia y comportamiento humanos provocadas por la psilocibina como parte del fenotipo extendido del hongo? El comportamiento extendido del *Ophiocordyceps* deja una huella en el mundo en forma de cicatrices fosilizadas en los enveses de las hojas. ¿Se puede pensar en el comportamiento extendido de las setas psilocibinas como en una impronta dejada en el mundo en forma de ceremonias, rituales, cánticos y otros frutos culturales y tecnológicos de nuestros estados alterados? ¿Visten los hongos psilocibina nuestras mentes, tal y como el *Ophiocordyceps* y el *Massospora* visten los cuerpos de los insectos?

Terence McKenna fue un gran defensor de esta visión. Tomando una dosis lo suficientemente grande, aseguró, se podría hasta esperar que la seta hablara, alto y claro, «elocuentemente sobre sí misma en la noche fría de la mente». Los hongos no tienen manos con las que manipular el mundo, pero con psilocibina como mensajero químico podrían apropiarse de un cuerpo humano, y usar su cerebro y sentidos para pensar y hablar a través de ellos. McKenna creía que los hongos podrían vestir nuestras mentes, ocupar nuestros sentidos y, lo más

importante, dar a conocer el mundo que hay ahí fuera. Los hongos podrían, entre otras cosas, usar la psilocibina para influir en los humanos en un intento por evitar nuestros hábitos destructivos como especie. Para McKenna, esta era una asociación simbiótica que presentaba posibilidades «más ricas y más barrocas, si cabe» que las que disponían los seres humanos o los hongos por separado.[33]

Como nos recuerda Dawkins, llegaremos hasta lo más lejos que queramos especular. Y cómo especulemos después depende de cómo organicemos nuestras predisposiciones. «Tú crees que el mundo es lo que parece cuando hace buen tiempo al mediodía –dijo en una ocasión el filósofo Alfred North Whitehead a su exalumno Bertrand Russell–. Yo creo que es lo que parece a primera hora de la mañana cuando uno justo se despierta de un sueño profundo.» En términos de Whitehead, Dawkins especula cuando hace buen tiempo al mediodía. Se deja la piel para asegurar que su especulación sobre los fenotipos extendidos sigue siendo 'aplicada' y 'firmemente restringida'. Es claro cuando dice que los fenotipos pueden extenderse más allá del cuerpo, pero no pueden extenderse *demasiado*. En cambio, McKenna especula al amanecer. Sus requisitos son menos estrictos y sus explicaciones, no tan restringidas. Entre los dos polos yace un continente de opiniones posibles.[34]

¿De qué manera las setas psilocibinas aguantan la comparación con los tres «requisitos estrictos» de Dawkins?

La capacidad de una seta para producir psilocibina es, sin duda, heredada. Además, es una capacidad que varía de una especie de setas a otra, y entre setas individuales. Sin embargo, para que el estado *ensetado* –las visiones, las experiencias místicas, la disolución del ego, la pérdida de la sensación de uno mismo– cuente como parte del fenotipo extendido de los hongos, se debe encontrar la condición clave final. Los hongos que orquestan estados alterados 'mejores' –lo que eso pueda significar– deben pasar en sus genes con mayor éxito. Los hongos deben distinguirse por la capacidad para influir en los seres humanos, y aquellos que proporcionan experiencias más exageradas y deseables deben beneficiarse en detrimento de los que proporcionan experiencias menos deseables.

A simple vista, este tercer requisito parece decidir la cuestión. Los hongos que producen psilocibina pueden influir en el comportamiento humano pero, a diferencia del *Ophiocordyceps*, no viven dentro de nuestros cuerpos. Además, la especulación de McKenna es difícil que concilie con el hecho de que los seres humanos son los últimos en llegar a la historia de la psilocibina. Esta ya la

producían los hongos decenas de millones de años antes de la evolución del género *Homo* –las mejores estimaciones actuales sitúan la primera seta 'mágica' hace unos 75 millones de años–. Durante más del 90% de su historia evolutiva, los hongos que producen psilocibina han habitado en un planeta sin seres humanos y se las han apañado la mar de bien. Si los hongos de verdad se benefician de nuestros estados alterados, no pueden haberlo hecho durante mucho tiempo.[35]

Entonces, ¿qué *hizo* la psilocibina por esos hongos que desarrollaron la capacidad para producirla? De entrada, ¿para qué molestarse en hacerlo? Es una pregunta que se han formulado micólogos y entusiastas de las setas 'mágicas' durante décadas.

Es posible que la psilocibina no hiciera gran cosa por los hongos que la producen hasta que aparecieron los humanos. Hay muchos compuestos en hongos y plantas que se acumulan en páramos bioquímicos desempeñando papeles insignificantes como subproductos metabólicos casuales. A veces estos 'compuestos secundarios' se topan con un animal al que atraen, confunden o matan, en cuyo caso podrían empezar a beneficiar al hongo y convertirse en una adaptación evolutiva. Sin embargo, a veces no hacen más que proporcionar variaciones sobre un tema biomecánico que quizá algún día resulten útiles, o no.

Dos estudios publicados en el 2018 sugieren que la psilocibina sí que proporcionaba un beneficio a los hongos que la producían. Un análisis del ADN de especies de hongos productores de psilocibina revela que la capacidad para elaborar psilocibina evolucionó más de una vez. Más sorprendente fue el descubrimiento de que el grupo de genes que se necesitan para crear psilocibina ha saltado entre linajes fúngicos por transferencia genética horizontal varias veces a lo largo de su historia. Tal y como hemos visto, la transferencia genética horizontal es el proceso por el que los genes y las características que los apuntalan se mueven entre organismos sin la necesidad de tener sexo ni de tener descendencia. Es un hecho cotidiano en las bacterias –y cómo la resistencia a antibióticos puede expandirse rápidamente entre poblaciones bacterianas–, pero es raro en hongos que crean setas. Es incluso más raro que grupos complejos de genes metabólicos salten entre especies permaneciendo intactos. El hecho de que el grupo de genes de psilocibina permaneciera de una pieza mientras se movía sugiere que aportaba una ventaja importante a cualquier hongo que expresara el atributo. Si no hubiera sido así, el atributo se habría deteriorado rápidamente.[36]

Pero, ¿de qué ventaja se trataba? El grupo de genes de psilocibina saltó

entre especies de hongo que vivían estilos de vida similares en madera en descomposición y excrementos de animales. En estos hábitats también vivían muchos insectos que ‘comen o compiten’ con hongos, y todos ellos deberían ser sensibles a la potente actividad neurológica de la psilocibina. Parece probable que el valor evolutivo de la psilocibina resida en su capacidad para influir en el comportamiento animal. Pero cómo, exactamente, no está claro. Los hongos y los insectos comparten una historia larga y complicada. Algunos hongos matan, tal es el caso del *Ophiocordyceps* o el *Massospora*. Algunos cooperan a lo largo de inmensos tramos de tiempo evolutivo, como los que conviven con las hormigas cortadoras de hojas y las termitas. En ambos casos, los hongos usan sustancias químicas para cambiar el comportamiento del insecto. El *Massospora* incluso va más lejos al utilizar la psilocibina para conseguir su propósito. ¿Cuál fue el camino por el que se desvió la psilocibina? Hay disparidad de opiniones. Monitorizar los efectos de la psilocibina en los organismos que la consumen no es sencillo, ni siquiera en seres humanos quienes, al menos, intentan explicar sus experiencias y rellenar test psicométricos. ¿Qué posibilidad tenemos de averiguar qué hace la psilocibina a la mente de un insecto? Hay pocos estudios sobre esta materia en animales, algo que empeora las cosas.[37]

¿Podía la psilocibina ser un disuasorio producido por los hongos para confundir el ingenio de sus plagas de insectos? De ser así, no parece muy efectivo. Hay especies de jején y de mosca que rutinariamente hacen sus nidos en setas ‘mágicas’. Los caracoles y las babosas los devoran sin que les afecte a simple vista. Y se ha visto a hormigas cortadoras de hojas buscando desesperadamente cierto tipo de seta con psilocibina para traérselas de una pieza al nido y comérselas. Estos descubrimientos han llevado a algunos a suponer que, lejos de ser un disuasorio, la psilocibina servía como señuelo, cambiando de alguna manera el comportamiento del insecto en formas que beneficiaba al hongo.[38]

La respuesta quizá se halle en algún lugar intermedio. Las setas psilocibinas que son tóxicas para algunos animales podrían ser un buen alimento para aquellos capaces de desarrollar resistencia. Algunas especies de moscas son resistentes a los venenos producidos por la *Amanita phalloides*, por ejemplo, y tienen, por tanto, casi un acceso exclusivo. ¿Podrían estos insectos tolerantes a la psilocibina servir al hongo ayudándolo a esparcir sus esporas? ¿Defendiéndolo de otras plagas? Y, de nuevo, volvemos a especular.

Podríamos no saber cómo la psilocibina sirvió a los intereses de los hongos los primeros millones de años de su existencia. Pero ahora, desde una posición privilegiada, está claro que la interacción de la psilocibina con las mentes humanas ha transformado el porvenir evolutivo de las setas que la producen. Los hongos que producen psilobicina desarrollan una relación buena y fácil con los seres humanos. Lejos de actuar como repelente –para que se produjera una sobredosis, un ser humano tendría que comer 1000 veces más setas de las que se necesitan para un *tripi* normal–, la psilocibina ha hecho que los seres humanos salgan a buscar las setas, las lleven de un sitio a otro y desarrollen métodos para cultivarlas. Al hacerlo, hemos contribuido a la dispersión de sus esporas, que son lo bastante ligeras para recorrer largas distancias por el aire, y en gran cantidad: si se deja una sola seta en cualquier superficie durante unas horas, esta expulsará suficientes esporas para dejar una espesa mancha negra. Al topar con un nuevo tipo de animal, una sustancia química que podría, en su momento, haber servido para confundir y disuadir a las plagas, ha sido transformada en un irresistible señuelo en pocos cambios rápidos. En solo cuestión de unas décadas del siglo XX, el paso de las setas 'mágicas' del anonimato al estrellato internacional es una de las historias más espectaculares en los anales de las relaciones humanas con los hongos.[39]

En la década de 1930, Richard Evans Schultes, botánico de Harvard, leyó las crónicas del siglo XV escritas por frailes españoles sobre la «carne de los dioses», y quedó fascinado. Con las pocas fuentes que sobrevivieron quedaba claro que en partes de Centroamérica las setas psilocibinas habían crecido en centros gravitacionales culturales y espirituales. Las habían empezado a usar las divinidades locales, y su consumo había alimentado una idea de lo divino en el que las mismísimas setas aparecían con especial protagonismo.

¿Podían crecer estas setas en el México actual? Un botánico mexicano dio un soplo a Schultes y, en 1938, este partió hacia los valles remotos del noreste de Oaxaca. (El mismo año que Albert Hofmann aisló por primera vez el LSD de los cornezuelos en un laboratorio farmacéutico de Suiza.) Schultes descubrió que el pueblo mazateco seguía consumiendo setas. Los curanderos organizaban veladas regulares de setas para curar a los enfermos, localizar objetos perdidos y dar consejos. Solía haber setas en los pastos próximos a las aldeas. Schultes recogió especímenes y publicó sus descubrimientos. Reveló que el consumo de estas setas provocaba «risa, habla incoherente, y… visiones fantásticas en colores maravillosos».[40]

En 1952, Gordon Wasson, un micólogo *amateur* y vicepresidente del banco J. P. Morgan, recibió una carta del poeta y erudito Robert Graves que hablaba del informe de Schultes. Wasson se quedó fascinado por las noticias de Graves sobre la «carne de los dioses» que altera los estados de conciencia y viajó a Oaxaca en busca de las setas. Allí conoció a una curandera llamada María Sabina, quien le invitó a una velada de setas. Wasson describió su experiencia como «demoledora del alma». En 1957, publicó una crónica de su vivencia en la revista *Life*. El artículo se tituló *En busca de las setas mágicas: un banquero de Nueva York va a las montañas de México para participar en los ritos ancestrales de los indios que mascan extraños brotes que producen visiones*.[41]

El artículo de Wasson lo leyeron millones de personas y causó furor. Por aquel entonces ya hacía 14 años que se conocían las propiedades que alteran los estados de conciencia del LSD, y había una comunidad activa de investigadores que estudiaban sus efectos. Sin embargo, el artículo de Wasson era una de las primeras crónicas sobre una sustancia psicodélica alteradora del estado de conciencia que llegaba al gran público. «Setas mágicas» se convirtió en un término familiar –un concepto de entrada– más o menos de la noche a la mañana. En su autobiografía, Dennis McKenna recuerda a su hermano Terence, que entonces tenía 10 años, «siguiendo a nuestra madre mientras hacia sus tareas domésticas, agitando la revista y preguntándole más cosas. Pero, por supuesto, ella no tenía nada que añadir».[42]

Todo fue muy deprisa. Un miembro de la expedición de Wasson envió una muestra de las setas ‘mágicas’ a Hofmann, y enseguida identificó, sintetizó y dio nombre al ingrediente activo: psilocibina. En 1960, Timothy Leary, respetado académico de Harvard, se enteró de la existencia de estas setas ‘mágicas’ a través de un amigo y se fue a México a probarlas. Su experiencia, un «viaje visionario», le impactó mucho y regresó siendo «un hombre cambiado». De vuelta a Harvard, inspirado por su experiencia con las setas, Leary abandonó su proyecto de investigación y creó el Harvard Psilocybin Project. «Desde que me comí siete setas en un jardín en México –escribió más tarde sobre su experiencia–, he dedicado todo mi tiempo y energía a explorar y describir las profundidades de estos extraños reinos.»[43]

Los métodos de Leary desataron la polémica. Abandonó Harvard y empezó a difundir su punto de vista, según el cual la revolución cultural y la iluminación espiritual se podían alcanzar mediante el consumo de psicodélicos, y pronto alcanzó notoriedad. En muchas apariciones en televisión y radio, hizo

proselitismo sobre el LSD y sus muchos beneficios. En una entrevista a *Playboy*, sugirió que en un 'viaje' normal de ácido las mujeres podían llegar a tener un millar de orgasmos. Compitió con Ronald Reagan como candidato a gobernador de California y perdió. Avivado en parte por el proselitismo de Leary, el movimiento contracultural de la década de 1960 adquirió fuerza. En 1967, en San Francisco, Leary, ahora 'sumo sacerdote' del movimiento psicodélico, pronunció un discurso en el festival Human Be-In al que asistieron decenas de miles de personas. Poco después, en una humareda de reacciones violentas y escándalos, el LSD y la psilocibina se ilegalizaron. A finales de la década, casi todas las investigaciones que se llevaban a cabo sobre los efectos de los psicodélicos se habían cancelado o pasaron a la clandestinidad.[44]

La ilegalización de la psilobicina y el LSD marcó el comienzo de un nuevo capítulo en la historia evolutiva de las setas psilocibinas. La mayoría de las investigaciones de las décadas de 1950 y 1960 se habían llevado a cabo con LSD, o pastillas de psilocibina sintética, casi todas elaboradas por Hofmann en Suiza. Pero a principios de la década de 1970, el interés por las setas 'mágicas' creció, por una parte por los riesgos legales asociados a la psilobicina pura y el LSD, y por la otra, porque escaseaban. Y a mediados de esa misma década, se descubrió que especies de setas psilocibinas crecían en muchos rincones del mundo, de Estados Unidos a Australia. Sin embargo, el suministro de setas silvestres se ve restringido por las condiciones estacionales y la localización. Cuando regresaron de Colombia a principios de la década, Terence y Dennis McKenna intentaron encontrar un abastecimiento más continuado. Su solución fue radical: en 1976, publicaron un librito titulado *Psilocybin: Magic Mushroom Growers' Guide* (Psilocibina: Guía del cultivador de hongos mágicos). Equipados con este fino volumen, los hermanos McKenna decían que cualquiera podía producir cantidades ilimitadas de un psicodélico potente desde la comodidad de su cobertizo, con poco más que unos tarros y una olla a presión. El proceso solo era un poco más complicado que hacer mermelada, y hasta un novato podía encontrarse a sí mismo, en palabras de Terence, «con el oro alquímico hasta el cuello».[45]

Los McKenna no fueron los primeros en cultivar setas psilocibinas pero sí en publicar un método fiable para cultivar grandes cantidades de setas sin un equipo especial de laboratorio. La *Guía del cultivador* fue un exitazo y vendió

más de 100 000 ejemplares en los cinco años posteriores a su publicación. Estrenó un nuevo campo de micología de hágalo usted mismo, e influyó en un joven micólogo llamado Paul Stamets, el descubridor de cuatro nuevas especies de setas psilocibinas y el autor de una guía para poder identificar las setas psilocibinas.

Stamets ya estaba trabajando en nuevas maneras de cultivar toda suerte de setas '*gourmet* y medicinales', y en 1983 publicó *The Mushroom Cultivator*, donde aún simplificaba más las técnicas de cultivo. En la década de 1990, mientras los foros en línea para cultivadores de setas 'mágicas' proliferaban, emprendedores de Países Bajos vieron un vacío legal que les permitía vender abiertamente setas psilocibinas, y muchos cultivadores holandeses de setas comestibles de supermercado se pasaron a la producción de setas alucinógenas. A principios de la década del 2000, la moda se había extendido por Inglaterra, y se vendían cajas de setas psilocibinas naturales en las calles comerciales de Londres. En el 2004, la Camden Mushroom Company estaba moviendo 100 kg de setas naturales a la semana, el equivalente a unos 25000 *tripis*. Poco después las setas psilocibinas se ilegalizaron, pero el secreto ya estaba en la calle. Hoy en día, los kits instantáneos se venden ya en línea. Los cruces entre cepas de hongos producen nuevas variedades, desde el «profesor dorado» al «Mc Kennai», cada una con efectos sutilmente diferentes.[46]

Durante todo el tiempo que los seres humanos han salido a buscar setas psilocibinas –y, por consiguiente, dispersando alegremente sus esporas–, los hongos se han beneficiado de su capacidad para juguetear con nuestra conciencia. Desde la década de 1930, estos beneficios se han multiplicado muchas veces. Antes del viaje de Wasson a México, pocas personas aparte de las comunidades indígenas de Centroamérica sabían de la existencia de las setas psilocibinas. Pero 20 años después de su llegada a Norteamérica, había empezado una nueva historia de domesticación. En despensas, dormitorios y naves industriales, algunas especies tropicales de hongos encontraron nuevas vidas en climas templados a los que no estaban habituados.[47]

Y lo que es más, desde el primer artículo de Schultes a finales de la década de 1930, se habían catalogado más de 200 nuevas especies de hongos productores de psilocibina, incluido un liquen que crece en la pluvisilva ecuatoriana. Resulta que hay algunos entornos, pocos, donde estas setas no crecen, aunque llueva lo suficiente. Como dice un investigador, las setas psilocibinas «se dan en abundancia allí donde abundan los micólogos». Las

guías permiten que los seres humanos encuentren, identifiquen y recojan –y, por consiguiente, dispersen– setas psilocibinas que habrían estado ilocalizables décadas atrás. Varias de estas especies sienten un cariño especial por los hábitats estropeados por los seres humanos, donde se acomodan fácilmente. Como confiesa irónicamente Stamets, muchas sienten cierto apego por los espacios públicos, incluidos «parques, complejos residenciales, escuelas, iglesias, campos de golf, complejos fabriles, guarderías, jardines, áreas de descanso en autopistas y edificios públicos –también juzgados municipales y estatales y prisiones–».[48]

¿Nos acercan más las ocurrencias de las últimas décadas a que se cumpla el tercer requisito de Dawkins? ¿Se puede pensar que estos hongos nos piden prestados un cerebro humano con el que pensar y una conciencia humana con la que experimentar? ¿Puede el ser humano bajo los efectos de las setas realmente sucumbir a su influencia, como una hormiga infectada sucumbe a la influencia del *Ophiocordyceps*?

Para que nuestros estados de conciencia alterada cuenten como un fenotipo extendido de los hongos, los seres humanos *ensetados* necesitarían atender a los intereses reproductivos de esos hongos que han consumido. Pero no parece que este sea el caso. Son muy pocas las especies que se cultivan y, en gran parte, se decide qué cepas de hongo producir en función de cuáles son los más fáciles de cultivar y cuáles dan mayores cosechas –no está claro que se escojan los ‘mejores’ alteradores de mentes por encima de los ‘peores’ alteradores de mentes–. Y para añadir una complicación más, si todos los seres humanos se extinguieran en un solo instante, la mayoría de especies de setas psilocibinas seguirían viviendo sin problema. Los hongos que producen psilocibina no dependen enteramente de nuestros estados de conciencia alterada, no así el *Ophiocordyceps* que sí depende enteramente del comportamiento alterado de las hormigas. Durante decenas de millones de años, estos hongos han crecido y se han reproducido bien sin los seres humanos, y probablemente seguirían haciéndolo.

¿De verdad eso importa? «Uno podría pensar que con el aislamiento […] de la psilocibina y la psilocina, las setas de México habían perdido su magia», escribieron Schultes y Hofmann en 1992. Con la domesticación de hongos productores de psilocibina, se pueden cultivar cientos de kilogramos de setas en naves industriales de Ámsterdam. Con el aislamiento de la psilocibina, se puede

inutilizar la red neuronal por defecto con la ayuda de los escáneres del cerebro. Las experiencias místicas, el asombro y la disolución del ego se pueden provocar en una cama de hospital. Pero, ¿cuánto más nos acercan estos avances a entender la manera en la que la psilocibina influye en las mentes humanas?

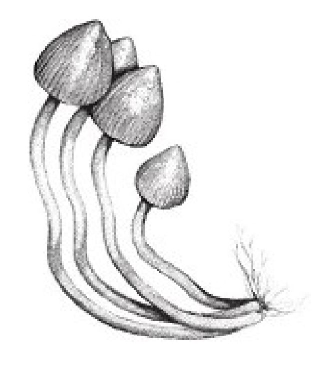
Para Schultes y Hofmann, la respuesta fue «no mucho». Las experiencias místicas son aquellas que, por definición, se resisten a la explicación racional; no encajan fácilmente en la valoración numerada de los test psicométricos. Confunden y cautivan, y sin duda, suceden. Como dicen Schultes y Hofmann, la investigación científica de la identidad y estructura de la psilocibina y psilocina había «mostrado simplemente que las propiedades mágicas de las setas son las propiedades de dos compuestos cristalinos». Es un descubrimiento que hace poco más que rehuir la pregunta. «Su efecto en la mente humana es tan inexplicable, y tan mágico, como las setas mismas.»[49]

Los efectos de las setas psilocibinas quizá no cuentan como un fenotipo extendido en un sentido estricto, pero ¿significa esto que deberíamos descartar la especulación de Terence McKenna? Quizá no deberíamos ir tan rápido. «Nuestra conciencia normal –escribió el filósofo y psicólogo William James en 1902– es solamente un tipo especial de conciencia, mientras a su alrededor, que está separado de ella por la más vaporosa de las pantallas, aguardan formas potenciales de conciencia totalmente diferentes.» Por razones que apenas se comprenden, ciertos hongos sacan a los seres humanos de lo que les resulta familiar hacia formas de conciencia totalmente diferentes y los acerca al filo de nuevas preguntas. «Ninguna explicación del universo en su totalidad puede ser la definitiva pues deja estas otras formas de conciencia bastante olvidadas», concluyó James.[50]

Ya sea para un investigador, un paciente o solo un espectador, lo curioso de estas sustancias químicas de los hongos es precisamente las *experiencias* que provocan. La especulación de McKenna alimentada por las setas puede estirar los límites de la posibilidad mental y biológica. Y ese es precisamente el caso: los efectos de la psilocibina en mentes humanas estiran los límites de lo que parece posible. En la cultura mazateca, es obvio que las setas hablan; cualquiera que las tome lo puede experimentar en sus carnes. La suya es una visión compartida por muchas culturas tradicionales que usan plantas u hongos enteógenos. Y es una visión que suelen explicar los usuarios de hoy en día en

entornos no tradicionales, muchos de los cuales informan de un encogimiento de las fronteras entre «el uno mismo» y «lo otro», y de «una fusión» con otros organismos.

¿Es el mundo lo que parece cuando hace buen tiempo al mediodía? ¿O es lo que parece ser al alba cuando nos despertamos del sueño? Tal vez hay cosas en las que todo el mundo coincide. Independientemente de si los hongos hablan a través de los seres humanos y ocupan nuestras mentes, el impacto de las setas psilocibinas en nuestros pensamientos y creencias es real. Si imaginamos que un hongo podía vestir nuestra mente y disfrutaba jugueteando en nuestra conciencia, ¿qué esperábamos encontrarnos? Pues canciones sobre setas, estatuas de setas, pinturas de setas, mitos y leyendas protagonizados por setas, ceremonias donde se loan las setas, una comunidad global de micólogos autosuficientes que ingenian nuevas formas de cultivar setas en sus casas, evangelistas micológicos como Paul Stamets que hablan a las masas sobre cómo las setas pueden salvar el mundo. Y personas como Terence McKenna que afirma ser capaz de verbalizar en inglés lo que le dicen los hongos.



***Psilocybe semilanceata,* o «mongui».**

# 5

# ANTES DE LAS RAÍCES

*Nunca te librarás de mí.*
*Hará un árbol de mí.*
*No te despidas de mí.*
*Describe el cielo para mí.*

**KATHLEEN BRENNAN Y TOM WAITS**

Hace 600 millones de años, en algún momento las algas verdes empezaron a salir de las aguas someras hacia tierra firme. Fueron las antecesoras de todas las plantas terrestres. La evolución de las plantas transformó el planeta y su atmósfera, y significó una de las transiciones fundamentales en la historia de la vida –un profundo avance en la adaptación biológica–. Hoy las plantas constituyen el 80% de la biomasa en la Tierra y son la base de las cadenas alimentarias que sustentan prácticamente todos los organismos terrestres.[1]

Antes de que apareciesen las plantas, la superficie terrestre estaba cuarteada y era inhóspita. Las condiciones eran extremas. Las temperaturas fluctuaban incontroladamente y los paisajes eran roca y polvo. No había nada que hoy reconoceríamos como suelo. Los nutrientes estaban encerrados en rocas sólidas y minerales y el clima era seco. Pero esto no significa que la Tierra estuviera totalmente desprovista de vida. Cortezas compuestas por bacterias fotosintéticas, algas extremófilas y hongos podían buscarse la vida al aire libre. Aunque las condiciones eran tan extremas en tierra que la vida se desarrollaba sobradamente a nivel acuático. Los mares y lagunas, cálidos y someros, rebosaban de algas y de animales. Escorpiones gigantes de mar patrullaban el suelo oceánico, trilobites araban, con sus hocicos a modo de palas, los lechos marinos, corales solitarios empezaron a formar acantilados y los moluscos comenzaron a multiplicarse.[2]

Las condiciones en tierra firme eran, en comparación, inhóspitas, pero aun así proporcionaban bastantes oportunidades a aquellos organismos fotosintéticos que pudiesen superarlas. Al aire libre, el agua no filtraba la luz del sol, y era más

fácil acceder al dióxido de carbono –incentivos no faltaban para aquellos organismos que se alimentaban de luz y de dióxido de carbono–. Pero los antecesores algares de las plantas terrestres no tenían raíces, ni forma de almacenar o transportar agua, y cero experiencia en extraer nutrientes del suelo sólido. ¿Cómo superaron el difícil paso a tierra seca?

Cuando toca descifrar el origen de los tiempos, los eruditos no se ponen de acuerdo. Hay pocas pruebas y los pedacitos que sobreviven a menudo apoyan puntos de vista diferentes. Pero, en medio de tanta desavenencia ígnea sobre la pretérita historia de la vida, sobresale una pieza en la que los académicos están de acuerdo: las algas solo pudieron salir a tierra firme cuando entablaron nuevas relaciones con los hongos.[3]

Estas alianzas antediluvianas evolucionaron a lo que ahora llamamos relaciones micorrícicas. Hoy, más del 90% de todas las especies de plantas dependen de los hongos micorrícicos. Son la regla, no la excepción: son una parte fundamental del mundo de las plantas, más incluso que la fruta, las flores, las hojas, la madera o incluso las raíces. Por esta íntima asociación –donde no faltan la cooperación, el conflicto y la competición–, las plantas y los hongos micorrícicos representan una prosperidad colectiva que apuntala nuestro pasado, presente y futuro. Somos impensables sin ellos, y aun así raras veces pensamos en ellos. El precio de nuestra negligencia nunca ha sido más obvio. No podemos permitirnos seguir con esta actitud.[4]

Tal y como hemos visto, las algas y los hongos tienen una tendencia a asociarse. Una asociación que puede adoptar muchas formas. Un ejemplo serían los líquenes; las macroalgas –y las algas– serían otro: muchas macroalgas arrastradas hacia las costas dependen de los hongos para alimentarse y no desecarse. Y después están las bolas verdes blandas producidas en solo unos días por los investigadores de Harvard cuando insertaron hongos y algas de vida libre entre sí. Mientras los hongos y las algas tengan un buen encaje ecológico –mientras canten juntos una ‘canción’ metabólica que ninguno de los dos puede cantar por separado– se fundirán en relaciones simbióticas totalmente nuevas. En este sentido, la unión de hongos y algas que dio origen a las plantas es parte de una historia más larga, un estribillo evolutivo.[5]

En los líquenes, los socios se unen para crear juntos un organismo diferente a sus miembros individuales, pero los socios en una relación micorrícica no lo hacen así: las plantas siguen siendo reconocibles como plantas, y los hongos micorrícicos, como hongos. Esto conduce a un tipo de simbiosis muy diferente, más promiscua, en la que una sola planta se puede emparejar con muchos hongos a la vez, y un solo hongo se puede emparejar con muchas plantas.

Para que la relación prospere, la planta y el hongo deben hacer buena pareja metabólica. Es un pacto familiar. En la fotosíntesis, las plantas absorben carbono de la atmósfera y lo convierten en compuestos de hidratos de carbono –azúcares y lípidos– de los que dependen casi todo el resto de la vida. Al crecer en las raíces de las plantas, los hongos micorrícicos adquieren el acceso privilegiado a estas fuentes de energía: se alimentan. No obstante, la fotosíntesis no basta para sustentar la vida. Las plantas y los hongos necesitan más que una fuente de energía. Tienen que buscar agua y minerales del suelo –rico en texturas y microporos, cavidades cargadas de electricidad y laberintos pútridos.

Los hongos son astutos vigilantes de esta tierra indómita y pueden buscar alimento de una manera que las plantas no son capaces de hacerlo. Al hospedar a los hongos en sus raíces, las plantas mejoran notablemente su acceso a estas fuentes de nutrientes. Ellas también se alimentan. Al asociarse, las plantas ganan un hongo protésico, y los hongos, una planta protésica; ambos se valen del otro para expandir su alcance. Es un ejemplo de la «duradera intimidad de los desconocidos» de Lynn Margulis. Salvo que ya hayan dejado de ser unos extraños. Y eso queda claro cuando se mira en el interior de la raíz.

Tras la lente de un microscopio las raíces son todo un mundo. Me he pasado semanas observándolas, unas veces cautivado y otras, impotente. Si se ponen raíces frescas y en buen estado en una placa con agua, se verá a las hifas de los hongos ramificándose. Si se hierven las raíces en colorante y se trituran en un portaobjetos de cristal, se las verá entrelazarse. Las hifas se bifurcan y se unen y se expanden dentro de las células de las plantas en un tumulto de filamentos que se ramifican. La planta y el hongo se abrazan. Cuesta imaginar posturas más íntimas.

Lo más extraño que he visto en un microscopio son las «semillas de polvo» germinando. Estas semillas de polvo son las semillas de planta más pequeñas del mundo; al ojo humano, una sola semilla es como un pelo pequeño o la punta de una pestaña. Las orquídeas las crean, pero también otras plantas. No pesan casi nada y el viento o la lluvia las dispersa con facilidad. Pero no germinan hasta

que encuentran un hongo. He invertido mucho tiempo intentando sorprenderlas en el acto. Enterré miles de semillas de polvo en bolsitas y las desenterré meses más tarde con la esperanza de que algunas hubieran brotado. En una placa de vidrio del microscopio repartí las semillas con una aguja para buscar signos de vida. Y a los pocos días descubrí lo que buscaba: algunas semillas se habían hinchado formando carnosas matas de hifas fúngicas enredadas, pegajosas cintas que husmeaban por la placa; dentro de las raíces crecientes se enmarañaban formando nudos y espirales. No era sexo: las células de hongos y de plantas no se habían fusionado ni tan solo habían aunado su información genética. Pero resultaba sexi: las células de dos criaturas diferentes se habían encontrado y, yuxtapuestas como estaban, colaboraban para crear una vida nueva. Imaginarse una futura planta como disociada al hongo era absurdo.

No está claro cuándo se produjo la primera relación micorrícica. Hay quien se atreve a decir que los encuentros más pretéritos fueron cortejos pringosos y desorganizados: hongos que buscaban alimento y refugio en las algas que habían sido arrastradas hasta las cenagosas orillas de lagos y ríos. En cambio, los hay que sugieren que las algas conquistaron tierra firme con sus socios fúngicos a remolque. Da igual como fue, me explicó Katie Field, profesora en la Universidad de Leeds, «pronto pasaron a tener una mutua dependencia».

Field es una excelente investigadora que se ha pasado años estudiando los linajes más antiguos de las plantas de nuestros días. Valiéndose de marcadores radioactivos, mide los intercambios que se producen entre hongos y plantas en cámaras de cultivo que simulan climas prehistóricos. Sus maneras simbióticas le aportan pistas sobre cómo se relacionaban las plantas y los hongos en las fases más tempranas de su migración a tierra firme. También los fósiles, sorprendentemente, nos permiten acercarnos a estas alianzas antediluvianas. Los mejores especímenes tienen 400 millones de años y conservan la huella inconfundible de los hongos micorrícicos en su interior: lóbulos ligeros que recuerdan a los actuales. «Puedes ver el hongo que, en realidad, vive en las células de las plantas», se maravillaba Field.[6]

Las plantas más pretéritas eran poco más que charcos de tejido verde, sin raíces ni otras estructuras especiales. Con el paso del tiempo, desarrollaron toscos órganos carnosos para albergar a sus socios fúngicos, que hurgaban en el suelo en busca de nutrientes y agua. Para cuando se desarrollaron las raíces, la

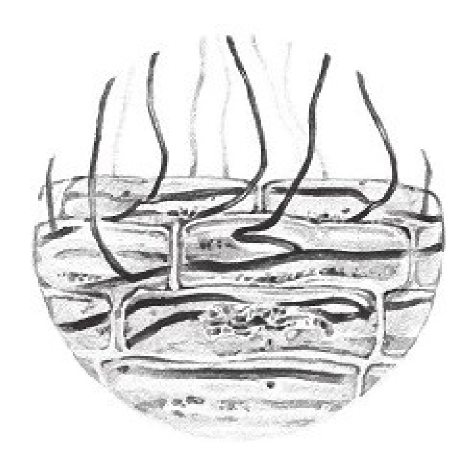
asociación micorrícica ya tenía unos 50 millones de años. Los hongos micorrícicos son las raíces de toda la vida posterior en tierra firme. La palabra «micorriza» lo sintetiza muy bien: para nacer, las raíces *(rhiza)* siguieron a los hongos *(mykes)*.[7]

Hoy, centenares de millones de años más tarde, las plantas han desarrollado raíces más finas, que crecen más rápido, que son oportunistas y que se comportan más como hongos. Pero ni siquiera estas raíces superan a los hongos cuando se trata de explorar el suelo. Las hifas micorrícicas son 50 veces más finas que la más fina de las raíces y pueden ser hasta 100 veces más largas que las raíces vegetales. Estaban antes que las raíces y tienen mayor alcance. Algunos investigadores van incluso más allá. «Las plantas no tienen raíces –uno de mis profesores en prácticas lo explicó en una clase a unos alumnos sorprendidos–. Tienen hongos-raíces, micorrizas.»[8]

Los hongos micorrícicos son tan prolíficos que su micelio constituye entre una tercera parte y la mitad de la biomasa del suelo terrestre. La cifra es astronómica. A nivel global, la longitud total de hifas micorrícicas en los 10 cm superficiales del suelo equivale a la mitad de la anchura de nuestra galaxia (4,5 x $10^{17}$ km frente a 9,5 x $10^{17}$ km). Si se plancharan estas hifas sobre una sábana lisa, su superficie cubriría 2,5 veces más que la que cubre cada pulgada seca de la Tierra. No obstante, los hongos no paran quietos. Las hifas micorrícicas se marchitan y vuelven a crecer tan rápidamente –entre 10 y 70 veces por año– que, en cuestión de un millón de años, acumularían una longitud que excedería el diámetro del universo conocido (4,8 x $10^{10}$ años luz de hifas, versus 9,1 x $10^{9}$ años luz en el universo conocido). Teniendo en cuenta que los hongos micorrícicos existen desde hace unos 500 millones de años y no se quedan solo en los 10 cm superficiales del suelo, estas cifras son, en realidad, un cálculo muy bajo.[9]

En su relación, plantas y hongos micorrícicos representan una polaridad: los brotes de las plantas se dedican a la luz y el aire, mientras que los hongos y las raíces vegetales se dedican a la tierra firme. Las plantas convierten la luz y el dióxido de carbono que absorben en azúcares y lípidos. Los hongos micorrícicos deshacen los nutrientes adheridos en la roca y en los detritus. Estos son hongos con una vocación dual: una parte de su vida transcurre dentro de una planta y la otra parte, en el suelo. Están colocados en la entrada de carbono a los ciclos de vida terrestre y zurcen la relación de la atmósfera con el suelo. Hasta la fecha, los hongos micorrícicos ayudan a las plantas a lidiar con la sequía, el calor y

demás estreses que les plantea la vida en la tierra desde los albores de los tiempos, como hacen los hongos simbióticos que se hacinan en las hojas y los tallos de las plantas. Lo que llamamos «plantas» son, en realidad, hongos que han evolucionado para cultivar algas, y algas que han evolucionado para cultivar hongos.



**Hongo micorrícico en la raíz de una planta.**

La palabra «micorriza» fue acuñada en 1885 por el biólogo alemán Albert Frank –sí, el mismo Albert Frank cuya fascinación por los líquenes le llevó a acuñar la palabra «simbiosis» ocho años antes–. Posteriormente fue contratado por el Ministerio de Agricultura, Dominios y Silvicultura del Reino de Prusia, para «fomentar el cultivo de la trufa», un cargo que le obligó a concentrarse en el suelo. Y como pasó a muchos, de antes y de ahora, las trufas fueron el señuelo que tiró de él hacia el subsuelo de los hongos.

Frank no tuvo mucho éxito con las trufas, pero en sus indagaciones documentó con todo lujo de detalles el enmarañamiento entre las raíces de los árboles y el micelio de los hongos de la trufa. Sus diagramas plasman los ápices de las raíces enredados en una funda de micelio, con hifas retorciéndose hacia fuera sobre la página. Frank se quedó impresionado por la camaradería de la asociación, y sugirió que la relación entre las raíces vegetales y sus compañeros, los hongos, no era parasitaria sino beneficiosa para ambos. Y como venía siendo habitual entre los científicos que estudiaban la simbiosis, utilizó los líquenes como una analogía para dar sentido a la asociación micorrícica. Desde su punto de vista, las plantas y los hongos micorrícicos estaban sujetos a una

«dependencia íntima, recíproca». El micelio micorrícico se comportaba como un «enfermero de la humedad», y activaba «la alimentación total del árbol desde el suelo».[10]

Las ideas de Frank fueron atacadas sin piedad, como había pasado con la hipótesis dual de los líquenes de Simon Schwendener. Para los detractores de Frank, la idea de que la simbiosis podía ser de beneficio mutuo –un «mutualismo»– era una fantasía sentimental. Si un socio parecía beneficiarse, lo hacía a un precio. Cualquier simbiosis que parecía beneficiosa mutuamente implicaba en realidad conflicto y parasitismo disfrazado.[11]

Decidido, Frank invirtió 10 años en entender las relaciones de las plantas con sus hongos 'enfermeros'. Realizó exquisitos experimentos con pinos de semillero; algunos los cultivó en suelo esterilizado, y otros, en suelo recogido en un pinar cercano. Los que crecieron en suelo boscoso establecieron relaciones con los hongos y se convirtieron en árboles más grandes y saludables que los que crecieron en suelo esterilizado.[12]

Los descubrimientos de Frank llamaron la atención de J. R. R. Tolkien, quien tenía fama de tenerle cariño a las plantas y, en particular, a los árboles. Los hongos micorrícicos pronto encontraron un hueco en *El señor de los anillos*.[13] «Para ti, pequeño jardinero y amante de los árboles», dijo la elfa Galadriel al hobbit Sam Gamyi:

> Tengo solo un pequeño regalo […]. Esta caja contiene tierra de mi jardín […], si la guardas y regresas algún día a tu casa, quizá tengas entonces tu recompensa. Aunque lo encontrarás todo árido y yermo, pocos jardines florecerán como el tuyo en la Tierra Media si esparces allí esta tierra.

Cuando al final regresó a casa se encontró con una Comarca destruida:

> Sam Gamyi plantó retoños en todos aquellos lugares donde antes había árboles particularmente hermosos o queridos, y colocó un grano del valioso polvo de Galadriel en el suelo, en la raíz de cada uno […]. Durante todo el invierno esperó tan pacientemente como pudo, tratando de contenerse para no ir a ver a cada momento si algo sucedía. La primavera colmó con creces las más locas esperanzas de Sam. Sus árboles empezaron a brotar y a crecer como si el tiempo mismo tuviese prisa y quisiese hacer en un año lo que hace en 20.

Tolkien podía haber estado describiendo el crecimiento de plantas en el Devónico, hace 300-400 millones de años. En ese período, las plantas, ya consolidadas en la tierra y alimentadas por altos niveles de luz y de dióxido de carbono, se extendían por todo el mundo y desarrollaban formas más grandes y complejas que en períodos anteriores. En cuestión de pocos millones de años, los

árboles de 1 m de altura se convirtieron en árboles de 30 m. Durante esta etapa, mientras las plantas prosperaban, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera disminuyó un 90%, desatando un período de enfriamiento global. ¿Pudieron las plantas y sus socios, los hongos, haber desempeñado un papel en esta enorme transformación de la atmósfera? Algunos investigadores, entre ellos Field, creen que es probable.[14]

«Los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera descendieron espectacularmente mientras las plantas terrestres evolucionaban hacia estructuras cada vez más complejas», me explicó Field. El aumento de la productividad de las plantas posteriormente dependió de sus socios micorrícicos. Es una serie predecible de sucesos. Una de las mayores limitaciones para que la planta no crezca es que le falte fósforo para nutrirse. Y una de las acciones que los hongos micorrícicos hacen mejor –una de sus 'canciones' metabólicas más sonadas– es extraer fósforo del suelo y transferirlo a sus socios vegetales. Si las plantas son fertilizadas con fósforo, crecen más. Cuanto más crecen las plantas, más dióxido de carbono absorben de la atmósfera. Cuantas más plantas viven, más plantas mueren, y más carbono queda enterrado en suelos y sedimentos. Y cuanto más carbono se entierra, menos hay en la atmósfera.

El fósforo es solo una pieza del relato. Los hongos micorrícicos utilizan ácidos y presiones altas para hurgar en la roca sólida. Con su ayuda, las plantas del Devónico pudieron extraer minerales como calcio y sílice. Una vez liberados, estos minerales reaccionan con el dióxido de carbono, extrayéndolo de la atmósfera. Los compuestos resultantes –carbonatos y silicatos– llegan a los océanos donde los organismos marinos los utilizan para hacer sus conchas. Cuando dichos organismos mueren, las conchas se hunden y se apilan a cientos de metros de profundidad en el lecho oceánico, que se convierte en un enorme cementerio de carbono. Si se suma todo esto, el clima empieza a cambiar.[15]

Me preguntaba si hay alguna manera de medir el impacto de los hongos micorrícicos en los antiguos climas del planeta.

«Sí y no –me respondió Field–. Hace poco lo intenté.» Para hacerlo, ella colaboró con el biogeoquímico Benjamin Mills, un colega investigador de la Universidad de Leeds, que trabaja con modelos virtuales que ofrecen predicciones sobre el clima y la composición de la atmósfera.[16]

Muchos investigadores crean modelos climáticos. Los meteorólogos y científicos climatológicos dependen de estas simulaciones digitales para predecir futuros escenarios. Pero también lo hacen los investigadores cuando intentan

reconstruir transiciones en el pasado del planeta. Con solo cambiar los números marcados en el modelo, se pueden probar diferentes hipótesis sobre la historia del clima en la Tierra. ¿Qué pasa cuando se sube el dióxido de carbono? ¿Qué sucede cuando se baja la cantidad de fósforo al que acceden las plantas? El modelo no puede decirnos lo que ocurrió en realidad pero sí qué factores pueden marcar la diferencia.

Antes de que Field contactara con él, Mills no había incluido los hongos micorrícicos en el modelo. Podía variar la cantidad de fósforo que obtenían las plantas. Sin embargo, sin tener en cuenta los hongos micorrícicos, no hay manera de hacer estimaciones realistas de la cantidad de fósforo a la que las plantas pudieron acceder. Y aquí Field podía ayudar. En sus experimentos, descubrió que el resultado de las relaciones micorrícicas variaba en función de las condiciones climáticas en sus cámaras de cultivo. Unas veces, las plantas se beneficiaban más de la situación, y otras veces, menos, una característica que ella bautizó como «eficiencia simbiótica». Si las plantas se enganchan a un socio micorrícico eficiente, reciben más fósforo y crecen más. Field fue capaz de estimar cuán eficiente debía haber sido el intercambio micorrícico hace 450 millones de años, cuando los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera eran muy superiores a los actuales.

Cuando Mills añadió los hongos micorrícicos al modelo utilizando los ajustes de Field, descubrió que se podía cambiar todo el clima del planeta con solo subir o bajar la eficiencia simbiótica: la cantidad de dióxido de carbono y oxígeno en la atmósfera, así como las temperaturas globales, variaron según la eficiencia del intercambio micorrícico. Según los datos de Field, los hongos micorrícicos habrían contribuido considerablemente a la espectacular reducción de dióxido de carbono que siguió al apogeo de las plantas en el Devónico. «Es uno de esos momentos en los que piensas ¡uala, a ver, un momento! –exclamó Field–. Nuestros resultados sugieren que las relaciones micorrícicas han tenido un papel considerable en la evolución de casi toda la vida en la Tierra.»[17]

Y siguen teniéndolo. El libro de Isaías del Antiguo Testamento cuenta que «toda la carne es hierba». Es un razonamiento que hoy describiríamos como ecológico: en cuerpos animales, la hierba se convierte en carne. Pero, ¿por qué detenernos ahí? La hierba solo se convierte en hierba cuando la sustentan los hongos que

viven en sus raíces. ¿Quiere esto decir que toda la hierba es hongo? Si toda la hierba es hongo, y toda la carne es hierba, ¿podríamos decir que toda la carne es hongo?

Quizá no toda pero sí alguna, desde luego: los hongos micorrícicos pueden proporcionar hasta el 80% del nitrógeno a una planta, y hasta el 100% de su fósforo. Los hongos suministran otros nutrientes vitales para las plantas, como zinc y cobre. Además, proporcionan agua a las plantas y las ayudan a sobrevivir a sequías como lo han hecho desde tiempos inmemoriales. A cambio, las plantas reparten hasta el 30% del carbono que absorben a sus socios micorrícicos. Lo que ocurre exactamente entre una planta y un hongo micorrícico en un determinado momento depende de quien esté involucrado.

Hay muchas formas de ser una planta, y muchas formas de ser un hongo. Y hay muchas maneras de establecer una relación micorrícica: es una forma de vida que ha evolucionado más de 60 veces en diferentes linajes de hongos desde que las algas empezaron a migrar a tierra firme. Como sucede con muchos atributos que han desafiado las contrariedades para evolucionar más de una vez –ya sea la capacidad para cazar nematodos, formar líquenes o manipular el comportamiento animal–, cuesta no tener la sensación de que estos hongos han dado con una estrategia ganadora.[18]

Los socios fúngicos de una planta pueden tener un impacto visible en su crecimiento –y en su carne–. Hace unos años, en una convención sobre relaciones micorrícicas, conocí a un investigador que había estado cultivando fresas con diferentes comunidades de hongo micorrícico. El experimento era sencillo. Si se cultivaba la misma especie de fresa con diferentes especies de hongo, ¿cambiaría el sabor de las fresas? Organizó una degustación a ciegas y descubrió que diferentes comunidades de hongos sí que parece que cambian el sabor de la fruta. Las había que tenían más sabor, algunas eran más jugosas, otras, más dulces.

Cuando repitió el experimento un segundo año, el tiempo impredecible empantanó los efectos de los hongos micorrícicos en el sabor de las fresas pero aparecieron otros efectos sorprendentes. Los abejorros se sintieron más atraídos por las flores de las fresas cultivadas con algunas especies de hongos, y menos atraídos por otras. Las plantas cultivadas con determinadas especies de hongos produjeron más frutos que otras. Y el aspecto de las fresas cambió en función de

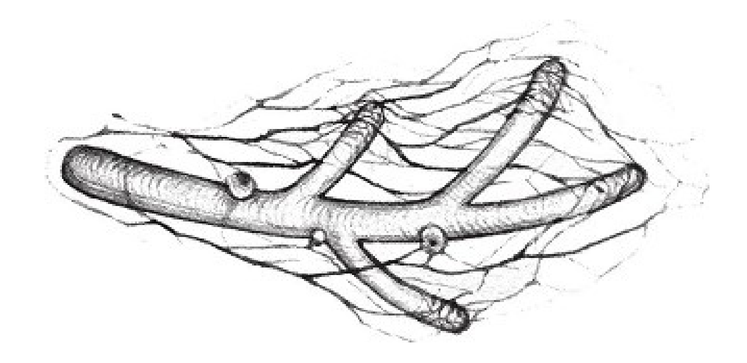
con qué hongos se las asoció: algunas comunidades micorrícicas hicieron más atractivas a las fresas, y otras comunidades hicieron que estas fueran menos sugerentes.[19]

Pero las fresas no son las únicas sensibles a la identidad de sus socios fúngicos. La mayoría de plantas –desde las bocas de dragón de macetero a las secuoyas gigantes– se desarrollarán de forma diferente cuando se cultiven con distintas comunidades de hongo micorrícico. Las albahacas, por ejemplo, producen diferentes perfiles de los aceites aromáticos que forman su sabor cuando crecen con diferentes cepas micorrícicas. Algunos hongos crean tomates más dulces que otros; los hay que cambian el perfil del aceite esencial del hinojo, el cilantro y la menta; otros aumentan la concentración de hierro y carotenoides en las hojas de la lechuga, la actividad antioxidante en alcachofas, o la concentración de compuestos medicinales en la hierba de San Juan y la equinácea. En el 2013, un equipo de investigadores italianos horneó hogazas de pan utilizando trigo cultivado con diferentes comunidades micorrícicas. El pan se sometió a pruebas con nariz electrónica, y a un jurado formado por 10 «degustadores expertos» de la Universidad de Ciencias Gastronómicas de Bra (Italia). (Los responsables del estudio aseguraron que cada degustador «tenía un mínimo de dos años de experiencia en evaluación sensorial».) Sorprendentemente, dado el número de fases por las que pasa el pan desde la colecta de trigo a la degustación –molienda, mezcla y horneado, además de la incorporación de levadura–, tanto el jurado como la nariz electrónica fueron capaces de distinguir las hogazas. El pan que había crecido con una comunidad de hongos micorrícicos realzada tenía un «sabor más intenso» y una «elasticidad y desmigajado» mejorados. Al oler una flor, al masticar ramitas, hojas o corteza, o al beber un vino, ¿cuántos aspectos más del subsuelo micorrícico de la planta seríamos capaces de degustar? A menudo me lo pregunto.[20]

«Qué delicado es el mecanismo que mantiene el equilibrio de poder entre los miembros de la población del suelo», reflejó la micóloga Mabel Rayner en *Trees and Toadstools* (Árboles y hongos venenosos), un libro sobre relaciones micorrícicas, publicado en 1945. Diferentes especies de hongo micorrícico podrían provocar que una hoja de albahaca sepa diferente o una fresa produzca frutos más apetecibles. Pero ¿cómo? ¿Hay socios fúngicos ‘mejores’ que otros? ¿Son algunas plantas ‘mejores’ socias que otras? ¿Pueden las plantas y los

hongos explicarnos la diferencia entre socios opcionales? Ya han pasado algunas décadas desde que Rayner hiciera su observación y solo estamos empezando a entender los complejos comportamientos que conservan el equilibrio simbiótico entre plantas y hongos micorrícios.[21]

Las interacciones sociales nos exigen mucho. Según algunos psicólogos evolutivos, los cerebros grandes y los intelectos flexibles surgieron para permitir movernos en complejas situaciones sociales. Hasta la interacción más pequeña está insertada en una constelación social cambiante. Según el *Chambers Dictionary of Etymology*, la palabra «*entangle*» (enredar, involucrar) se utilizó por primera vez para describir dichas interacciones humanas, o nuestra implicación en 'asuntos complejos'. No fue hasta más tarde que la palabra adquirió otros significados. Los seres humanos desarrollamos la inteligencia, según se cree, porque estábamos involucrados en una exigente oleada de interacciones.[22]



**Ápice de raíz micorrícica.**

Plantas y hongos micorrícicos no tienen un cerebro que podamos reconocer, pero en realidad viven vidas involucradas y han tenido que desarrollar maneras para gestionar asuntos complejos. Lo que ocurre en el mundo sensorial de los hongos se informa a las plantas asociadas para que actúen-elijan la acción. De manera parecida, lo que acontece en el mundo sensorial de las plantas se informa a los hongos asociados para que se comporten en consecuencia. Las acciones de las plantas reciben información de lo que ocurre en el mundo sensorial de sus socios fúngicos. De forma similar, los comportamientos de los hongos reciben información de lo que sucede en el mundo sensorial de sus socios vegetales. Los brotes y hojas de una planta, que utilizan la información suministrada por entre 15 y 20 sentidos diferentes, exploran el aire y modifican su comportamiento en función de los cambios continuados y sutiles en sus entornos. Miles de millones

de ápices de raíces exploran el suelo, cada uno capaz de establecer múltiples conexiones con diferentes especies de hongos. Y mientras tanto, un hongo micorrícico debe rastrear fuentes de nutrientes, multiplicarse en su interior, relacionarse con otras poblaciones de microbios –ya sean fúngicos, bacterianos u otros–, absorber los nutrientes y desviarlos por la red dispersa de un cuerpo. Un número inmenso de ápices hifales deben integrar la información que, en un momento dado, puede ser encauzada a diferentes tipos de plantas y difundida a decenas de metros.

Toby Kiers, profesora de la Universidad Libre de Ámsterdam, es una de las investigadoras que ha hecho más por investigar cómo las plantas y los hongos conservan su 'equilibrio de poder'. Valiéndose de rastreadores radioactivos, o adosando etiquetas fotoemisoras, ella y su equipo son capaces de rastrear el carbono que pasa de las raíces de las plantas a las hifas de los hongos, y el fósforo que pasa de los hongos a las raíces de las plantas. Midiendo con sumo cuidado estos flujos, ha sido capaz de describir algunas de las maneras en las que ambos socios gestionan su intercambio. ¿Cómo dirigen sus exigentes paisajes sociales las plantas y los hongos micorrícicos?, le pregunté a Kiers.

Ella se rio: «En realidad queremos descubrir la complejidad de lo que ocurre. Sabemos que hay un trato de por medio. La cuestión es si podemos predecir cómo cambian las estrategias de ese trato. Me sobrepasa pero ¿por qué no intentarlo?».

Los descubrimientos de Kiers son sorprendentes porque sugieren que ni la planta ni el hongo controlan totalmente la relación. Entre ellos, son capaces de llegar a compromisos, decidir compensaciones y desplegar sofisticadas estrategias negociadoras. En una tanda de experimentos, Kiers descubrió que las raíces de las plantas suministraban carbono preferiblemente a cepas de hongos que las abastecían con más fósforo. En agradecimiento, los hongos que recibían más carbono de la planta le proporcionaban más fósforo. El intercambio era, en cierto modo, negociado entre los dos en función de la disponibilidad de los recursos. Kiers tenía la hipótesis de que estas 'recompensas recíprocas' han ayudado a estabilizar las asociaciones entre plantas y hongos a lo largo del desarrollo evolutivo. Como ambos socios comparten el control del intercambio, ninguno de los dos debería ser capaz de apropiarse de la relación para su propio y exclusivo beneficio.[23]

Aunque tanto plantas como hongos, en general, tienden a beneficiarse de la relación, diferentes especies de plantas y hongos tienen diferentes maneras

simbióticas. Algunos hongos hacen socios más dispuestos a cooperar; otros son menos cooperativos y ‘acapararán’ el fósforo en lugar de intercambiarlo con sus plantas asociadas. Sin embargo, hasta el acaparador no estaría todo el rato acaparando; su comportamiento es flexible porque hay algunas negociaciones sobre la mesa que dependen de lo que ocurre a su alrededor y en otras partes de sí mismos. Sabemos muy poco de cómo funcionan estos comportamientos, pero está claro que en un determinado momento las plantas y los hongos se enfrentan a algunas opciones. Y las opciones conllevan elecciones, sin importar como resulta que se toman estas elecciones –sea en una mente humana consciente, un algoritmo informático no consciente o cualquier cosa de entremedio.[24]

Ante ello, uno se pregunta: ¿Toman decisiones las plantas y los hongos, aunque no tengan cerebros?

«Siempre utilizo la palabra ‘decisión’ –me dijo Kiers–. Hay varias opciones y, de algún modo, la información tiene que ser integrada y se debe escoger una de las opciones. Creo que mucho de lo que estamos haciendo es estudiar decisiones a microescala.» Y, sin duda, estas elecciones se despliegan de muchas maneras. «Hay decisiones *absolutas* que se toman en cada ápice hifal –reflexionó Kiers–. O todo es relativo, en cuyo caso lo que ocurre dependería de lo que ocurre en el resto de la red.»

Intrigada por estas cuestiones, y habiendo leído la obra de Thomas Piketty acerca de la desigualdad de ingresos en las sociedades humanas, Kiers empezó a pensar sobre el papel de la desigualdad en las redes fúngicas. Ella y su equipo expusieron un solo hongo micorrícico a un suministro desigual de fósforo. Una parte del micelio podía acceder a una gran zona de fósforo, y otra, a una zona pequeña. A Kiers le interesaba saber de qué modo esto afectaría a las decisiones negociadoras del hongo en partes diferentes de la misma red. Y aparecieron algunos patrones reconocibles: en partes de una red de micelio donde el fósforo era escaso, la planta pagó un ‘precio’ más alto, suministrando más carbono al hongo por cada unidad de fósforo que recibía, y allí donde el fósforo estaba disponible más inmediatamente, el hongo recibía una ‘tarifa de cambio’ menos favorable; el ‘precio’ del fósforo parecía estar regido por esta dinámica de la oferta y la demanda que nos resulta tan familiar.[25]

Más sorprendente fue la manera en que el hongo coordinaba su comportamiento negociador por toda la red. Kiers identificó una estrategia de «compra bajo, vende caro». El hongo transportó vigorosamente el fósforo –utilizando sus dinámicos ‘motores’ microtubulares– desde zonas donde

abundaba, donde lo vendía a un 'precio' bajo cuando lo intercambiaba con la raíz de una planta, hasta las zonas donde escaseaba, donde lo vendía a un 'precio' más caro porque había más demanda. Al hacerlo, el hongo podía transferir una proporción mayor de su fósforo a la planta a una 'tarifa de cambio' más favorable, recibiendo con la operación mayores cantidades de carbono.[26]

¿Cómo se controlan estos comportamientos? ¿Puede el hongo detectar las diferencias en la 'tarifa de cambio' en toda su red y transportar vigorosamente fósforo para 'activar' el sistema? ¿O transporta siempre fósforo por su red desde zonas donde abunda a otras donde escasea, recibiendo unas veces una 'compensación' de la planta y otras, no? Aún no los sabemos. Sin embargo, los estudios de Kiers aportan cierta luz a algunas de las complejidades del intercambio entre hongos y plantas, y muestran cómo pueden aparecer soluciones a desafíos complejos. Todos estos comportamientos ilustran un patrón general. Cómo se comporta una planta o un hongo depende de con *quién* se esté asociando y de *dónde* esté. Uno puede pensar en las relaciones micorrícicas como una extensión continuada con dos extremos *(continuum)*, con parásitos en un polo y mutualistas cooperadores en el otro. Algunas plantas se benefician de sus hongos asociados en unas condiciones y no en otras. Si se cultivan plantas con mucho fósforo, quizá se vuelvan menos selectivas con las especies de hongos a las que se asocian. Si se cultivan hongos cooperativos junto a otros hongos cooperativos, quizá empiecen a cooperar menos. El mismo hongo, la misma planta, marco diferente, resultado distinto.[27]

Uno de mis colaboradores, un profesor de la Universidad de Marburgo, me explicó que siendo niño había visto una escultura, *The Vertical Earth Kilometre*, un mástil de 1 km de longitud enterrado en la tierra. Lo único que se ve es el extremo del mástil: una placa circular de latón a ras de suelo que parece una moneda. Me describió el vértigo que le produjo al imaginárselo, como si flotara sobre un océano de tierra, viéndole sus entrañas. La experiencia le sirvió para que toda la vida estuviera fascinado por las raíces y los hongos micorrícicos. Yo siento un vértigo parecido cuando pienso en la complejidad de las relaciones micorrícicas –kilómetros de vida enmarañada– acuchándose bajo mis pies.

Y en mí se instala un vértigo real cuando intento escalar desde lo muy pequeño a lo muy grande, desde las decisiones negociadoras microscópicas a nivel celular hasta el planeta entero, la atmósfera, los billones de árboles que

viven en la Tierra, y los miles de billones de kilómetros de hongos micorrícicos que los cosen con el suelo. Nuestras mentes no están preparadas para mantener el equilibrio cuando manejan semejantes cifras. Además, la historia de las relaciones micorrícicas crea muchos de estos cambios vertiginosos, desde el muy grande al muy pequeño y vuelta a empezar.[28]

El tamaño es un problema en el campo de la investigación micorrícica. Las relaciones micorrícicas se producen fuera de nuestra vista. Es difícil vivirlas, verlas o tocarlas. Su inaccesibilidad significa que casi todo el conocimiento que tenemos del comportamiento micorrícico procede de estudios en entornos controlados de laboratorios o invernaderos. Extrapolar estos descubrimientos hasta los complejos ecosistemas del mundo real no siempre es posible. Casi siempre solo vemos una pequeña parte del cuadro. Y en consecuencia, los investigadores saben más sobre lo que los hongos micorrícicos pueden hacer que sobre lo que, en realidad, hacen.[29]

Incluso en entornos controlados, cuesta saber cómo se comportan los hongos micorrícicos en cada momento. Por contraste a los estudios de Kiers, hay situaciones en las que los intercambios entre planta y hongo no parecen obedecer a lo que reconoceríamos como estrategias racionales de negociación. ¿Hay algo que se nos escapa y no logramos entender? Nadie puede estar seguro. Tenemos una idea muy ligera de cómo se produce el intercambio de sustancias químicas entre plantas y hongos, y como se controla a un nivel celular. «Intentamos estudiar cómo se desplazan estas sustancias por una red –me contó Kiers–; intentamos grabarlo en vídeo. Es una locura lo que allí pasa. Pero estos estudios son *difíciles*, y puedo entender por qué la gente preferiría trabajar con otro tipo de organismos.» Muchos micólogos comparten esta mezcla de entusiasmo e impotencia.[30]

¿Se puede pensar en estas asociaciones de otra manera? ¿Hay otros modos de apaciguar este vértigo? Tengo colegas que han encontrado salidas más intuitivas a su entusiasmo por las micorrizas. A algunos les encanta salir a buscar setas y al hacerlo –sean trufas, champiñones, rebozuelos o *matsutake*– se involucran en relaciones micorrícicas de forma espontánea. Otros se pasan horas con el microscopio estudiando hongos micorrícicos, que es casi el equivalente de un biólogo marino cuando se sumerge en el agua. Y los hay que se pasan horas cribando esporas micorrícicas del suelo, esferas de colores que bajo el microscopio brillan como huevos de pescado. Tengo un colega en Panamá que es un experto domador de esporas. Algunas noches hacíamos tentempiés con

esporas, trozos de galletita salada y nata agria: minúsculas migas de caviar micorrícico que preparábamos bajo el microscopio y nos las poníamos en la boca con unas pinzas. No aprendimos gran cosa pero el tema no era ese; se trataba de un ejercicio que nos ayudaba a mantener nuestro equilibrio cuando basculábamos de lo pequeño a lo grande. Estos fueron momentos excepcionales de contacto sin mediación con nuestros sujetos a estudiar, pasatiempos para recordarnos que los hongos micorrícicos no son entes esquemáticos mecánicos –uno no puede comerse una máquina o un concepto–, sino organismos vivos enzarzados en vidas que aún luchamos por entender.

Las plantas siguen siendo la puerta de entrada más fácil. El espectáculo micorrícico subterráneo suele aflorar a la superficie de la vida humana cotidiana a través de las plantas. Las innumerables interacciones microscópicas que suceden entre hongos y raíces se manifiestan, precisamente, en las plantas, en sus formas, su crecimiento, sus sabores y sus olores. Sam Gamyi, al igual que Albert Frank, pudo ver con sus propios ojos el resultado de las relaciones micorrícicas en árboles jóvenes: los retoños empezaron a brotar y crecer «como si el tiempo tuviera prisa». Cuando comemos una planta, saboreamos el fruto de una relación micorrícica. Cuando cultivamos una planta –en una maceta, un parterre o un parque municipal–, favorecemos las relaciones micorrícicas. Si lo extrapolamos más, las decisiones negociadoras microscópicas tomadas por plantas y hongos moldean bosques en continentes enteros.

La última Edad del Hielo terminó hace unos 11 000 años. Cuando el vasto casquete glaciar Laurentino se retiró, dejó al descubierto millones de kilómetros cuadrados en Norteamérica. Durante miles de años los bosques se expandieron hacia el norte. Usando registros de polen se pueden reconstruir las líneas temporales migratorias de diferentes especies de árboles; algunos –hayas, alisos, pinos, abetos, arces– se desplazaron muy deprisa, más de 100 m al año. Otros –plátanos, robles, abedules, pacanas– se desplazaron más despacio, unos 10 m al año.[31]

¿Fue así como respondieron estas especies al cambio climático? La relación entre los hongos y los antecesores de las plantas les permitió migrar a tierra seca. ¿Podrían las relaciones micorrícicas haber seguido desempeñando un papel en los movimientos de las plantas por el planeta cientos de millones de años después? Es posible. Ni las plantas ni los hongos se heredan entre sí. Heredan

una tendencia a asociarse pero dirigen lo que serían relaciones abiertas, según parámetros de otras muchas simbiosis ancestrales. Como en los primeros días de vida en tierra firme, las plantas se relacionan con quien tienen cerca. Lo mismo pasa con los hongos. Aunque esto podría ser un obstáculo –si una semilla de planta se encuentra con un hongo no compatible probablemente no sobrevivirá–, la capacidad para reformar sus relaciones, o desarrollar unas totalmente nuevas, permite a los socios reaccionar a circunstancias cambiantes. Un estudio publicado en el 2018 por investigadores de la Universidad de Columbia Británica reveló que la migración de los árboles puede depender además de su proclividad micorrícica. Hay especies de árboles que son más promiscuas que otras y pueden relacionarse con muchas especies de hongos diferentes. Cuando el casquete glaciar Laurentino se retiró, las especies que migraron más deprisa fueron las más promiscuas, aquellas que tuvieron mejores oportunidades para encontrar un hongo compatible cuando llegaran a un lugar nuevo.[32]

Los hongos que viven en las hojas y los brotes de las plantas –los «endófitos»– también pueden tener efectos espectaculares en la capacidad de la planta para labrarse una vida en un lugar nuevo. Si se recoge hierba de suelos salitrosos de la costa y se cultiva sin sus hongos endófitos, no podrá sobrevivir en su hábitat salitroso natural. Lo mismo ocurre con las hierbas que crecen en suelos geotérmicos. Los investigadores intercambiaron los hongos endófitos de cada tipo de hierba, para que las hierbas costeras crecieran con hongos geotérmicos y viceversa. La capacidad de las hierbas para sobrevivir en cada hábitat se intercambió: las hierbas costeras ya no podían crecer en suelos salitrosos de la costa pero prosperaban en suelos geotérmicos, y las hierbas geotérmicas ya no podían crecer en suelos geotérmicos pero prosperaban en los suelos salitrosos de la costa.[33]

Los hongos pueden condicionar qué plantas crecen y dónde; hasta pueden conducir la evolución a nuevas especies aislando unas poblaciones de plantas de otras. La isla de Lord Howe, que está entre Australia y Nueva Zelanda, tiene 9 km de largo y 1 km de ancho. En ella crecen dos especies endémicas de palmeras que se separaron. Una especie, la palmera centinela *(Howea belmoreana)*, crece en suelos volcánicos ácidos, y su hermanada, la kentia *(Howea forsteriana)*, vive en suelos calcáreos alcalinos. Los botánicos hace tiempo que están intrigados por saber qué fue lo que permitió el cambio radical de hábitats de la kentia. Un estudio publicado en el 2017 por investigadores del Imperial College London muestra que los hongos micorrícicos tuvieron gran

parte de la culpa. Descubrieron que cada una de las dos especies de palmeras se asocia a una comunidad de hongos diferente. La kentia puede establecer relaciones con hongos que le permiten vivir en suelos calcáreos alcalinos, pero dicha capacidad le impide poderse relacionar con los hongos micorrícicos de suelos volcánicos con los que antes tenía relación. O sea, que ahora la kentia solo se beneficia de los hongos de suelos calcáreos, y la palmera centinela solo se beneficia de los hongos de suelos volcánicos. Tras mucho tiempo viviendo en diferentes 'islas' micorrícicas, pero compartiendo la misma islita geográfica, la especie se convirtió en dos.[34]

La capacidad de las plantas y los hongos micorrícicos para remodelar sus relaciones tiene consecuencias profundas. De sobra lo conocemos: a lo largo de la historia humana, las asociaciones con otros organismos han ampliado el alcance tanto de humanos como de no humanos. Las relaciones humanas con el maíz trajeron nuevas civilizaciones; las relaciones con los caballos permitieron tener nuevos medios de transporte; y las relaciones con la levadura desembocaron en nuevas formas de producción y distribución de alcohol. En cada caso, los humanos y sus socios no humanos redefinieron sus posibilidades.

Los caballos y los seres humanos siguen siendo organismos distintos, como lo son las plantas y los hongos micorrícicos, pero ambos son repercusiones de una tendencia ancestral de los organismos a asociarse. Las antropólogas Natasha Myers y Carla Hustak aseveran que la palabra «evolución», que en sentido literal significa «enrollar hacia fuera», no captura la disposición de los organismos a involucrarse en las vidas de otros. Myers y Hustak sugieren que la palabra «involucración» (*involution* en inglés) –derivado de la palabra «involucrar» (*involve* en inglés)– describe mejor esta tendencia: un «enrollar, rizar, girar hacia dentro». Desde su punto de vista, el concepto de *involution* capta mejor el empujón y tirón enmarañado de los «organismos por inventar constantemente nuevas formas de convivencia». Fue su tendencia a involucrarse en las vidas de otros la que permitió a las plantas tomar prestado un sistema de raíces durante 50 millones de años mientras las desarrollaban por sí mismas. Hoy, aún con sus propias raíces, casi todas las plantas siguen necesitando a los hongos micorrícicos para que gestionen sus vidas bajo tierra. Sus tendencias 'implicativas' permitieron a los hongos tomar prestada un alga fotosintética para manejar sus asuntos con la atmósfera. Y todavía lo hacen. Los hongos micorrícicos no están incrustados en las semillas de las plantas. Plantas y hongos

deben formar y reformar constantemente sus relaciones. La implicación sigue abierta, y errática: al asociarse entre sí, todos los participantes salen y vagan más allá de sus límites previos.[35]

Ante un cambio medioambiental catastrófico, casi toda la vida depende de la capacidad de plantas y hongos para adaptarse a nuevas condiciones, ya sea en paisajes contaminados o deforestados, o en entornos recién creados como azoteas verdes urbanas. Los aumentos de dióxido de carbono en la atmósfera, los cambios climáticos y la polución influyen en las decisiones negociadoras microscópicas de las raíces vegetales y de sus hongos asociados. Y como ha venido ocurriendo desde tiempos inmemoriales, las influencias de estas decisiones negociadoras traspasan y se extienden a ecosistemas enteros y masas terrestres. Un estudio exhaustivo publicado en el 2018 sugería que el «deterioro alarmante» de la salud de los árboles de Europa se debía a la alteración de sus relaciones micorrícicas, ocasionada por la contaminación por nitrógeno. Las asociaciones micorrícicas que nazcan en el Antropoceno determinarán buena parte de la capacidad de los seres humanos para adaptarse a una emergencia climática que empeora. En ningún sitio las posibilidades –y dificultades– son más evidentes como en la agricultura.[36]

«De la eficacia de esta asociación micorrícica deben depender la salud y el bienestar de la humanidad.» Así lo escribió Albert Howard, pionero en el movimiento de la agricultura ecológica y defensor apasionado de los hongos micorrícicos. En la década de 1940, Howard sostenía que la aplicación extendida de fertilizantes químicos alteraría las asociaciones micorrícicas, los medios por los que «la alianza de un suelo fértil y el árbol al que nutre […] se organiza». Las consecuencias de una ruptura así serían devastadoras. Cortar estos «hilos fungosos vivos» debilitaría la salud del suelo, y posteriormente sufrirían la salud y productividad de los cultivos, y también la de los animales y las personas que los consumen. «¿Puede la humanidad regular sus asuntos para que su principal posesión, es decir, la fertilidad del suelo, se preserve? –cuestionó Howard–. El futuro de la civilización depende de la respuesta a esta pregunta.»[37]

El tono de Howard es dramático, y 80 años después de sus preguntas, aún es lacerante. Según como se mire, la agricultura industrial moderna ha sido efectiva: los cultivos se han duplicado durante la segunda mitad del siglo XX. Pero concentrarse solo en el rendimiento ha generado costes elevados. La

agricultura causa la destrucción generalizada del medio ambiente y es la responsable de una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Entre el 20 y el 40% de las cosechas se pierden cada año debido a las plagas y las enfermedades, pese al uso desmedido de pesticidas. Los rendimientos agrícolas globales se han estancado, a pesar de haberse multiplicado por 700 el empleo de fertilizante durante la segunda mitad del siglo XX. En todo el mundo, se pierde cada minuto el mantillo del suelo equivalente a 30 campos de fútbol. Y aun así, un tercio de la comida se desperdicia, y la demanda de cosechas se duplicará en el 2050. Es difícil exagerar la urgencia de esta crisis.[38]

¿Podrían ser los hongos micorrícicos parte de la solución? Tal vez sea una pregunta estúpida. Las relaciones micorrícicas son tan antiguas como las plantas y han estado moldeando el futuro de la Tierra durante millones de años, y siempre han aparecido en nuestros esfuerzos por alimentarnos, hayamos pensado en ellas o no. Durante miles de años, en muchas partes del mundo, se ha practicado la agricultura tradicional prestando atención a la salud del suelo y apoyando así, implícitamente, las relaciones entre hongos y plantas. Pero a lo largo del siglo XX, nuestra negligencia nos llevó al problema.

En 1940, la mayor preocupación de Howard era que se desarrollaran técnicas agrícolas industriales sin tener en cuenta «la vida del suelo». Tenía razones para estar preocupado. Al considerar los suelos, más o menos, como lugares sin vida, las prácticas agrícolas han arrasado las comunidades subterráneas que sustentan la vida que comemos. Es una percepción que guarda ciertos paralelismos con la medicina, que durante gran parte del siglo XX consideró que «germen» y «microbio» eran lo mismo. Claro que algunos organismos del suelo, igual que algunos microbios que viven en tu cuerpo, pueden causar enfermedades. Pero la mayoría hacen todo lo contrario. Altera la ecología de microbios que viven en tus intestinos y tu salud sufrirá –está comprobado que el número de enfermedades humanas crece por esa obsesión que tenemos por librarnos de los «gérmenes»–. Altera la rica ecología de los microbios que viven en el suelo –las entrañas del planeta– y la salud de las plantas también sufrirá.[39]

Un estudio publicado en el 2019 por investigadores de Agroscope, de Zúrich, calculó la magnitud de la alteración comparando el impacto de prácticas agrícolas ecológicas con el de prácticas convencionales intensivas en las comunidades fúngicas de las raíces de los cultivos. Al secuenciar el ADN de los

hongos, los autores fueron capaces de reunir redes que mostraban qué especies de hongos se asociaban entre sí. Descubrieron «diferencias notables» entre los campos tratados de forma ecológica y los gestionados de forma convencional. No solo había mayor abundancia de hongos micorrícicos en los primeros, sino que las comunidades de hongos eran infinitamente más complejas: se identificaron 27 especies de hongos altamente conectados, o ‘especies clave’, mientras que en los campos gestionados de forma convencional no se halló ninguno. Muchos estudios revelan descubrimientos similares. Las prácticas agrícolas intensivas –mediante su combinación de labranza y empleo de fertilizantes químicos y pesticidas– reducen la abundancia de hongos micorrícicos y alteran la estructura de sus comunidades. Las prácticas agrícolas más sostenibles, ecológicas y demás, favorecen una mayor diversidad de comunidades micorrícicas y una más rica abundancia de micelio fúngico en el suelo.[40]

¿Y eso importa? El sacrificio ecológico reina en casi toda la historia de la agricultura. Bosques talados para dejar espacio a los campos, setos cortados para que los campos sean más grandes... ¿Pasa lo mismo con las comunidades de microbios del suelo? Si los seres humanos nutren los campos de cultivo con fertilizantes, ¿no le quitamos el trabajo a los hongos micorrícicos? ¿Para qué preocuparnos de los hongos si los hemos inutilizado?

Los hongos micorrícicos hacen más que alimentar a las plantas. Los investigadores de Agroscope los describen como organismos clave, e incluso algunos prefieren llamarlos «ingenieros del ecosistema». El micelio micorrícico es una costura pegajosa y viva que compacta el suelo; quitemos los hongos y el suelo se desintegrará. Los hongos micorrícicos permiten que el suelo absorba un mayor volumen de agua, reduciendo la cantidad de nutrientes que el agua de lluvia se lleva del suelo hasta el 50%. Del carbono que hay en los suelos –que, sorprendentemente, equivale al doble del carbono que hay en plantas y en la atmósfera juntos–, una proporción considerable está adherida a los resistentes compuestos orgánicos que producen los hongos micorrícicos. El carbono que se filtra al suelo a través de canales micorrícicos sustenta complejas redes de alimentación. En una cucharadita de suelo saludable, además de los cientos o miles de metros de micelio fúngico, hay más bacterias, protistas, insectos y artrópodos que seres humanos han vivido en la Tierra.[41]

Los hongos micorrícicos pueden mejorar la calidad de una cosecha, como ilustran los experimentos con albahaca, fresas, tomates y trigo. También pueden

aumentar la capacidad de los cultivos para combatir las malas hierbas y realzar su resistencia a enfermedades preparando a los sistemas inmunológicos de las plantas. Pueden hacer que los cultivos sean menos vulnerables a la sequía y el calor, y más resistentes a la salinidad y a los metales pesados. Incluso alientan la capacidad de las plantas para defenderse de los ataques de plagas de insectos estimulando la producción de sustancias químicas defensivas. Y la lista no acaba aquí: hay mucha literatura sobre los beneficios de los hongos micorrícicos en las plantas. Pero llevar estos conocimientos a la práctica no siempre es fácil. Para empezar, las asociaciones micorrícicas no siempre aumentan los rendimientos de los cultivos. Y en algunos casos pueden hasta reducirlos.[42]

Katie Field es una de las muchas investigadoras que han sido subvencionadas para desarrollar soluciones micorrícicas a los problemas agrícolas. «Toda la relación es mucho más plástica y está mucho más afectada por el medio ambiente de lo que pensábamos –me comentó–. Hace mucho tiempo que los hongos *no están* ayudando a los cultivos a absorber nutrientes. Los resultados son súper variables. Depende completamente del tipo de hongo, el tipo de planta y el entorno en el que crece.» Bastantes estudios revelan resultados igual de impredecibles. En la actualidad, la mayoría de variedades de cultivos han sido desarrollados pensando poco en su capacidad para formar relaciones micorrícicas de alto funcionamiento. Hemos cultivado variedades de trigo para que crezca deprisa con ayuda de mucho fertilizante y así acabamos con plantas ‘estropeadas’ que casi han perdido la capacidad para cooperar con los hongos. «El solo hecho de que los hongos colonicen, aunque sea muy poco, estos cultivos de cereales, ya es un pequeño milagro», señaló Field.[43]

Las relaciones micorrícicas tienen tantas sutilezas que la intervención más mínima –como aportar hongos micorrícicos y otros microbios a las plantas– puede ser un arma de doble filo. A veces, y así lo descubrió Sam Gamyi, introducir plantas en una comunidad de microbios del suelo puede favorecer el crecimiento de cultivos y árboles y ayuda a restaurar la vida en suelos devastados. Sin embargo, que este acercamiento tenga éxito depende del ‘acoplamiento’ ecológico. Las especies micorrícicas que encajan poco podrían hacer más mal que bien a las plantas. Y lo que es peor, introducir especies de hongos oportunistas en nuevos entornos podría desplazar cepas locales de hongos con consecuencias ecológicas desconocidas. Es algo que no siempre tiene en cuenta la creciente industria de productos micorrícicos, a menudo comercializados como parches únicos que sirven para todo. Como pasa en el

hinchado mercado de los probióticos humanos, muchas de las cepas de microbios que se venden no se seleccionan porque sean especialmente compatibles, sino porque son fáciles de producir en instalaciones industriales. Aun haciéndolo con sabiduría, sembrar un entorno con cepas de microbios tiene sus limitaciones. Como pasa con cualquier organismo, a los hongos micorrícicos se les deben facilitar las condiciones para que fructifiquen. Las comunidades microbianas del suelo viven en un estado de reunión permanente y no van a permanecer juntas mucho tiempo si se alteran continuamente. Para que las intervenciones con microbios sean efectivas, se necesita llevar a cabo cambios profundos en las prácticas agrícolas, análogos a los cambios en la dieta o estilo de vida que deberíamos hacer para restaurar la salud de una flora intestinal dañada.[44]

Hay investigadores que enfocan el problema desde un ángulo diferente: si los seres humanos han cultivado irreflexivamente variedades de cultivos que establecen simbiosis disfuncionales con los hongos, ¿podríamos dar media vuelta y sembrar cultivos que hagan socios simbióticos de alto funcionamiento? Field apuesta por este acercamiento, y espera desarrollar variedades de plantas más cooperativas, «una nueva generación de súper cultivos que puedan establecer asociaciones asombrosas con los hongos». También Toby Kiers está interesada en estas posibilidades, pero enfoca la pregunta desde el punto de vista de los hongos. En lugar de cultivar plantas más cooperativas, prefiere cultivar hongos que se comporten de forma más altruista: cepas que acopien menos para que quizá así coloquen las necesidades de las plantas por encima de las suyas propias.[45]

En 1940, Albert Howard manifestó que carecíamos de «una explicación científica completa» de las relaciones micorrícicas. A las explicaciones científicas les queda mucho para que sean completas, pero la predisposición para trabajar con hongos micorrícicos para transformar la agricultura y la silvicultura y para restaurar entornos estériles solo ha aumentado porque la crisis medioambiental ha empeorado. Las relaciones micorrícicas evolucionaron para lidiar con los desafíos de un mundo inhóspito y barrido por el viento en los pretéritos días de la vida en tierra firme. Juntas, desarrollaron una forma de agricultura, aunque no es posible decir si las plantas aprendieron a cultivar

hongos o los hongos aprendieron a cultivar plantas. Sea como sea, nos enfrentamos al reto de cambiar nuestro comportamiento para que las plantas y los hongos puedan cultivarse mejor entre sí.[46]

Es difícil que lleguemos a alguna parte a menos que nos cuestionemos algunas de nuestras categorías. La visión de las plantas como individuos autónomos con límites claros causa destrucción. «Téngase en cuenta a un hombre ciego con un bastón –escribió el teórico Gregory Bateson–. ¿Dónde empieza el uno mismo en un hombre ciego? ¿En la punta del bastón? ¿En la empuñadura del bastón? ¿O en algún punto intermedio de la caña del bastón?» El filósofo Maurice Merleau-Ponty ya utilizó una disquisición teórica similar hace casi 30 años. Concluyó que el bastón de una persona ya no era solo un objeto; prolonga los sentidos de esta persona y pasa a formar parte de su equipo sensorial, un órgano protésico de su cuerpo. Dónde empieza y termina el uno mismo de la persona no es una pregunta tan sencilla como podría parecer a primera vista. Las relaciones micorrícicas nos desafían con una pregunta similar: ¿Podemos pensar en una planta sin además pensar en las redes micorrícicas que se enzarzan hacia fuera –erráticamente– desde sus raíces hasta el suelo? Si seguimos la extensión enmarañada del micelio que emana de sus raíces, entonces ¿dónde nos detenemos? ¿Pensamos en las bacterias que surcan el suelo por la viscosa película que abriga raíces e hifas fúngicas? ¿Pensamos en las redes de hongos vecinas que se fusionan con las de nuestra planta? Y –quizá la cuestión más desconcertante de todas–, ¿pensamos en las otras *plantas* cuyas raíces comparten precisamente la misma red fúngica? [47]

# 6

## WOOD WIDE WEBS

*Poco a poco, el espectador se da cuenta de que estos organismos están interconectados, no de forma lineal, sino en una tela reticular enmarañada.*

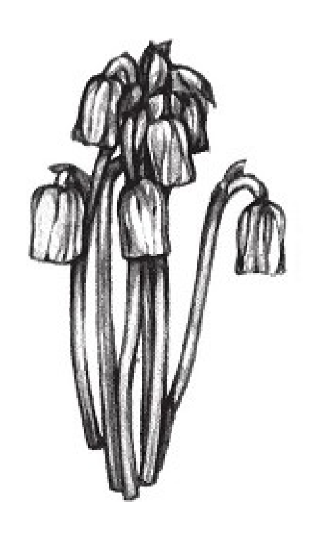
**ALEXANDER VON HUMBOLDT**

En la región del Pacífico Noroeste, en Norteamérica, los bosques son sobrecogedoramente verdes. De ahí que me quedara boquiabierto por las luminosas matas de plantas blancas que se hacen un hueco entre pilas de acículas caídas de abeto. Estas plantas fantasma no tienen hojas. Parecen pipas de tabaco de arcilla que cuelgan en equilibrio desde la punta. Pequeñas escamas envuelven sus tallos allí donde debería haber hojas. Brotan en las zonas más umbrías del suelo del bosque donde ninguna otra planta puede crecer y se apiñan en tupidos racimos, como hacen las setas. De hecho, si no fueran tan descaradamente flores, uno pensaría que son setas. Su nombre es *Monotropa uniflora*, y son plantas que juegan a no serlo.

Las *Monotropa* –«pipas fantasma»– abandonaron su capacidad para hacer la fotosíntesis hace muchísimo tiempo. Con ella, dejaron atrás las hojas y su color verde. ¿Pero cómo? La fotosíntesis es el más antiguo de los hábitos vegetales. En la mayoría de casos, es un proceso innegociable del reino vegetal. Y aun así, las *Monotropa* la han dejado atrás. Imagínate descubrir una especie de simio que en lugar de comer aloja bacterias fotosintéticas en su pelaje, que utiliza para crear energía de la luz solar. Es una desviación radical.

La solución de las *Monotropa* es de tipo fúngico. Como casi todas las plantas verdes, dependen de sus hongos micorrícicos asociados para sobrevivir; sin embargo, sus maneras simbióticas son distintas. Las plantas verdes ‘normales’ suministran carbohidratos, sean azúcares o lípidos, a sus hongos asociados a cambio de nutrientes minerales del suelo. Las *Monotropa* han resuelto cómo eludir la parte del intercambio, y en su lugar reciben *ambos*, el carbono y los nutrientes, de los hongos micorrícicos, y no parece que den nada a cambio.

Entonces, ¿*de dónde* procede el carbono de las *Monotropa*? Los hongos micorrícicos obtienen todo su carbono de las plantas verdes. O sea que el carbono que alimenta la vida de las *Monotropa* –el grueso de la sustancia de la que están hechas– debe proceder, por fuerza, de otras plantas a través de una red micorrícica compartida: si la *Monotropa* no recibiera el carbono que le da una planta verde a través de conexiones fúngicas compartidas, no podría sobrevivir.



***Monotropa uniflora.***

Las *Monotropa* desconciertan a los biólogos desde hace mucho tiempo. A finales del siglo XIX, un botánico ruso que lidiaba por resolver cómo podían vivir estas extrañas plantas fue el primero en sugerir que las sustancias podían pasar entre plantas por conexiones fúngicas. La idea no agradó. Fue una conjetura pasajera enterrada en un artículo que pasó sin pena ni gloria y sucumbió, más o menos, sin dejar rastro. El misterio de las *Monotropa* se esfumó durante otros 70 años hasta que fue rescatado por el botánico sueco Erik Björkman, quien, en 1960, inyectó azúcares radioactivos a tres árboles y así fue capaz de demostrar que tres plantas *Monotropa* próximas acumulaban radioactividad. Fue la primera vez que se demostró que las sustancias podían pasar entre plantas por un camino fúngico.[1]

Las *Monotropa* tentaron a los botánicos a descubrir una posibilidad biológica totalmente nueva. Y desde la década de 1980, ha quedado claro que las *Monotropa* no son una anomalía. La mayoría de plantas son promiscuas y pueden aliarse con muchos socios micorrícicos. También los hongos micorrícicos son promiscuos cuando se relacionan con las plantas, y redes

fúngicas independientes pueden fusionarse entre sí. ¿El resultado? Sistemas potencialmente vastos, complejos y colaborativos de redes micorrícicas compartidas.

*

«El hecho de que todos los lugares por los que paseamos estén conectados bajo tierra es, sencillamente, alucinante –dijo Toby Kiers entusiasmada–. Es enorme. No puedo creer que no haya más gente estudiándolo.» Yo comparto este sentimiento. Infinidad de organismos interactúan. Si uno traza un mapa de quién interactúa con quién, lo que se verá es una red. Sin embargo, las redes fúngicas establecen conexiones físicas entre plantas. Es la diferencia entre tener 20 conocidos y tener 20 conocidos con los que se comparte un sistema vascular. Estas redes micorrícicas compartidas –conocidas por los investigadores del campo como «redes micorrícicas comunes»– encarnan el principio más básico de la ecología: el de las relaciones entre organismos. La «tela reticular enmarañada» de Humboldt era una metáfora que él utilizó para describir la «totalidad viva» del mundo natural –un complejo de relaciones en el que los organismos están indisolublemente incrustados–. Las redes de micorrizas hacen que la malla y el tejido sean reales.[2]

Una de las siguientes personas en escoger la cuestión de las *Monotropa* y seguir con ella fue el científico inglés David Read, uno de los investigadores más distinguidos en la historia de la biología micorrícica y coautor del manual definitivo sobre la materia. Por su trabajo sobre las asociaciones micorrícicas recibió un título de caballero y fue nombrado miembro de la Royal Society. Read, a quien sus colegas estadounidenses llaman «sir Dude», es muy conocido por su encanto y por su ingenio impetuoso, a quien sus colegas investigadores suelen describir como todo un «personaje».

En 1984, Read y sus colegas fueron los primeros en demostrar de forma concluyente que el carbono podía pasar entre plantas verdes normales a través de conexiones fúngicas. Desde los estudios sobre las *Monotropa* de la década de 1960, los científicos contaban con la hipótesis de la posibilidad de dicha transferencia, pero nadie era capaz de demostrar que las raíces de una planta habían infiltrado los azúcares en el suelo y allí habían sido absorbidos por las raíces de otra planta. Dicho de otra manera, nadie había demostrado que el carbono había circulado entre plantas a través de un canal fúngico directo.

Read concibió una estrategia que le permitió ver concretamente la transferencia de carbono entre plantas. Cultivó plantas ‘donantes’ y plantas ‘receptoras’, unas junto a otras, algunas asociadas a hongos micorrícicos y otras, no. Pasadas seis semanas, nutrió a las plantas donantes con dióxido de carbono radioactivo. Después recogió las plantas y radiografió su sistema de raíces. Allí donde no hay hongos micorrícicos, se ve la radioactividad solo en las raíces de las plantas donantes. Allí donde se pueden formar las redes fúngicas, se puede ver radioactividad en las raíces de las plantas donantes, las hifas fúngicas y las raíces de las plantas receptoras. El avance de Read fue clave. Había demostrado que la transferencia entre plantas no era exclusiva de plantas como las *Monotropa*. Sin embargo, quedaban por resolver preguntas mayores. Read había realizado sus experimentos en el marco de un laboratorio y nada sugería que la transferencia de carbono entre plantas se pudiera dar en un entorno natural.[3]

Tres décadas más tarde, en 1997, una estudiante canadiense de doctorado, Suzanne Simard, publicó el primer estudio que sugería que el carbono sí podía pasar entre plantas en un entorno natural. Simard expuso parejas de plántulas de árbol de un bosque a dióxido de carbono radioactivo. Dos años más tarde, descubrió que el carbono había pasado de los abedules a los abetos, que compartían red micorrícica, pero no entre abedules y cedros que no la compartían. La cantidad de carbono obtenida por los abetos –una media del 6% del carbono marcado absorbido por los abedules– fue, según cálculos de Simard, una transferencia significativa: con el paso del tiempo, uno esperaría que esto afectara a la vida de los árboles. Por otro lado, cuando las plántulas de abeto estaban a la sombra –limitando su fotosíntesis y privándolas de su suministro de carbono– recibían más carbono de sus abedules donantes que cuando estaban al sol. El carbono parecía fluir ‘cuesta abajo’ entre plantas, de la abundancia a la escasez.[4]

El descubrimiento de Simard no pasó desapercibido. La revista *Nature* publicó su ensayo, y el editor pidió a David Read que escribiera un comentario. En su artículo «Los lazos que atan», Read sugirió que el estudio de Simard debería «estimularnos a examinar los ecosistemas del bosque desde un prisma nuevo». En la portada de la revista y en grandes letras aparecía una frase nueva que Read había acuñado en sus conversaciones con el editor de *Nature:* «The Wood Wide Web».[5]

Antes de los trabajos de Read, en las décadas de 1980 y 1990, Simard y demás, se había pensado en las plantas como en entidades, más o menos, diferentes. Hacía tiempo que se sabía que algunas especies de árbol forman injertos de raíces, donde las raíces de un árbol se fusionan con las de otro. Sin embargo, se consideraba que los injertos de raíces eran un fenómeno marginal y se sobreentendía que la mayoría de comunidades vegetales estaban compuestas por individuos que competían por recursos. Los hallazgos de Simard y Read insinuaban que quizá no era lo más correcto pensar en las plantas como en unidades netamente distinguibles. Tal y como Read anotó en su comentario en *Nature*, la posibilidad de que los recursos puedan pasar entre plantas sugería que «deberíamos centrarnos menos en la competición entre plantas y más en la distribución de recursos dentro de la comunidad».[6]

Simard publicó sus descubrimientos en un momento crucial del desarrollo de la moderna ciencia de redes. Internet, con su red de cables y rúters, estaba en plena expansión desde la década de 1970. La World Wide Web –el sistema de información basado en páginas web y enlaces entre ellas, que es posible gracias al *hardware* de internet– se inventó en 1989, y dos años más tarde pasó a estar a disposición del público. Cuando, en 1995, la US National Science Foundation renunció a la gestión exclusiva de la Red, internet empezó a expandirse de manera incontrolada y descentralizada. Tal y como me explicó el científico de redes Albert-László Barabási, «fue a mediados de los años noventa que las redes empezaron a entrar en la conciencia pública».[7]

En 1998, Barabási y sus colegas se embarcaron en un proyecto para mapear el World Wide Web. Hasta ese momento, los científicos carecían de las herramientas para analizar la estructura y propiedades de redes complejas, pese a su prevalencia en la vida humana. La rama de las matemáticas que se ocupa de las redes –la teoría de grafos– fue incapaz de describir el comportamiento de la mayoría de redes en el mundo real y muchas preguntas quedaron sin respuesta. ¿Cómo podían las epidemias y los virus informáticos propagarse tan rápido? ¿Por qué seguían funcionando algunas redes pese a la alteración masiva? Gracias al estudio de Barabási de la World Wide Web aparecieron nuevas herramientas matemáticas. Nacieron algunos principios clave para regir el comportamiento de una amplia variedad de redes, desde relaciones sexuales humanas a interacciones bioquímicas en los organismos. La World Wide Web, señaló Barabási, parecía tener «más cosas en común con una célula o un sistema ecológico que con un reloj suizo». Hoy, la ciencia de redes es ineludible. Escójase cualquier campo

que estudia la ciencia –desde la neurociencia a la bioquímica, sistemas económicos, epidemias, buscadores web, algoritmos de aprendizaje automático que apuntalan gran parte de la inteligencia artificial, la astronomía y la estructura del mismísimo universo, una red cósmica entrecruzada con filamentos de gas y cúmulos de galaxias– y habrá muchas probabilidades de que el fenómeno cobre sentido cuando se utilice un modelo de redes.[8]

Tal y como David Read me explicó, inspirado por el artículo de Simard, e impulsado por el resultón concepto de la Wood Wide Web, «toda la noción de redes micorrícicas compartidas se expandió de forma muy prolífica» –llegando incluso a *Avatar*, la película de James Cameron, donde las plantas se comunican por una red subterránea, viva y reluciente–. Los estudios de Read y Simard habían provocado nuevas e interesantes preguntas: ¿Qué más se podrían pasar las plantas, aparte de carbono? ¿Era habitual este fenómeno en la naturaleza? ¿Podría la influencia de estas redes extenderse por todos los bosques o ecosistemas? ¿Y cómo les afectaría?

Nadie niega que las redes micorrícicas compartidas están muy extendidas en la naturaleza. Son inevitables dada la promiscuidad de plantas y hongos, y la disposición de las redes de micelios a fusionarse entre sí. Sin embargo, no todo el mundo está convencido de que su papel sea importante.

Por un lado, desde la publicación del artículo de Simard en 1997 en *Nature*, muchas investigaciones han medido la transferencia de sustancias entre plantas. Las hay que han demostrado que por las redes fúngicas no solo pasa carbono, sino también nitrógeno, fósforo y agua en cantidades significativas. Un estudio publicado en el 2016 reveló que, a través de conexiones fúngicas, los árboles podían transferirse 280 kg de carbono por hectárea de bosque. La cantidad es considerable porque constituye el 4% del total de carbono extraído de la atmósfera en un año por la misma hectárea de bosque; el carbono suficiente para satisfacer los requisitos energéticos de un hogar medio durante una semana. Estos descubrimientos insinúan que las redes micorrícicas compartidas tienen un importante papel ecológico.[9]

Y por otro lado, algunas investigaciones no han logrado ver la transferencia de sustancias entre plantas. Pero esto no significa que las redes micorrícicas compartidas no desempeñen ningún papel: una plántula recién nacida que puede conectarse a una gran red fúngica ya existente no tendría que suministrar el

carbono que necesita para desarrollar desde cero su propia red micorrícica. Sin embargo, estos descubrimientos sugieren que no es sencillo generalizar de un ecosistema a otro, ni de un tipo de hongo a otro. Hay muchas situaciones donde las redes micorrícicas compartidas no parecen hacer mucho más por sus socios vegetales de lo que hace un socio micorrícico solo —podríamos decir que exclusivo.[10]

Se podría esperar una cierta variabilidad en el comportamiento de las redes micorrícicas compartidas. Existen muchos tipos de relación micorrícica, y los diferentes grupos de hongos se comportan de maneras bastante distintas. Incluso la conducta simbiótica de una sola planta y un hongo puede variar enormemente en función de sus circunstancias. Sin embargo, la variedad de conclusiones experimentales ha dado lugar a toda suerte de opiniones dentro de la comunidad científica. Para algunos estudiosos, las pruebas disponibles demuestran que las redes micorrícicas compartidas permiten formas de interacción que no son, por otro lado, posibles y pueden influir profundamente en el comportamiento de ecosistemas. Y hay investigadores que interpretan las pruebas de otra manera, y concluyen que las redes micorrícicas compartidas no activan posibilidades ecológicas únicas y para las plantas no son más importantes que compartir el espacio de las raíces o del aire.[11]

Las *Monotropa* pueden ejercer de guías para orientarse en el debate. De hecho, parecen resolverlo: su dependencia en redes micorrícicas compartidas es total. Le saqué el tema a David Read, que tomó una posición inequívoca: «La idea de que la transferencia entre plantas por un camino *fúngic*o no tenga importancia alguna es obviamente absurda». Las plantas *Monotropa* son receptoras a tiempo completo, gráficos testimonios vivos del hecho de que las redes micorrícicas compartidas son la base de un estilo de vida único.

A las *Monotropa* se las conoce como «micoheterótrofos». «Mico» porque dependen de un hongo; «heterótrofo» (de «hetero-», que significa «otro», y «-trofo», que significa «alimentador») porque no elaboran su propia energía a partir de los rayos del sol sino que tienen que conseguirla en otro sitio. Qué nombre tan feo para unas plantas tan carismáticas. En Panamá, donde estudié a las *Voyria*, los micoheterótrofos de flores azules, decidí llamarlas «*micohets*», aunque tampoco es que sea un nombre muy bonito.

Las *Monotropa* y las *Voyria* no son las únicas especies que presentan este estilo de vida. Un 10% de las especies vegetales comparten el hábito. Como los líquenes y las relaciones micorrícicas, la micoheterotrofía es un estribillo

recurrente de la evolución y ha aparecido de forma independiente, como mínimo, en 46 linajes vegetales. Algunos *micohets*, como las *Monotropa* y las *Voyria* nunca hacen la fotosíntesis. Otros se comportan como *micohets* cuando son jóvenes pero se convierten en donantes cuando crecen y empiezan a hacer la fotosíntesis, una estrategia que Katie Field llama «toma ahora, paga después». Tal y como me señaló Read, *todas* las 25000 especies de orquídea –«la familia vegetal más grande y, probablemente, más exitosa sobre la capa de la Tierra»– son *micohets* en alguna fase de su desarrollo, independientemente de si toman ahora y pagan después, o si toman ahora y siguen tomando más tarde. Esos *micohets* que repetidamente han aprendido a *hackear* la red para su propio beneficio sugieren que el truco no debe ser demasiado complicado. Es más, para Read y muchos otros científicos, los *micohets* no constituyen un categoría autónoma, sino que son solo uno de los polos del *continuum* simbiótico; los clientes fijos que han perdido su capacidad para pagar después. Las orquídeas que toman ahora y pagan después están en algún lugar más hacia el centro del espectro, como los retoños de abeto de Simard.[12]

Los *micohets* son sorprendentes. Llamativos e inconformistas, resaltan en medio de la vegetación. Sin tener motivos para ser verdes o para tener hojas, son libres para que la evolución les guíe hacia nuevas direcciones estéticas. Por ejemplo, hay una especie de *Voyria* que es totalmente amarilla. La «planta de la nieve» *(Sarcodes sanguínea)* es roja intensa, «como una luminosa e incandescente columna de fuego», escribió el naturalista estadounidense John Muir en 1912. Es «la (planta) más admirada por los turistas en California […] Su color recuerda el de la sangre». (Muir reflexionaba sobre los «mil cables invisibles» que la naturaleza teje, pero no notó que este fuera el caso para la planta de la nieve.) Fueron las semillas de polvo de las *Voyria* las que me dejaron atónito cuando las vi germinando en carnosas matas bajo un microscopio. Marc-André Selosse, un profesor del Museo Nacional de Historia Natural de Francia, en París, me explicó que cuando tenía 15 años fue la visión de una orquídea blanca *micohet* la que sembró de por vida su fascinación por la simbiosis. La orquídea era un recordatorio de lo inseparables que eran las vidas de plantas y hongos. «El recuerdo de esta planta me ha acompañado durante toda mi carrera hasta la fecha», reflexionó con cariño.[13]

Considero que los *micohets* son interesantes por lo que aportan sobre la vida subterránea de los hongos. En medio del festival vegetal de la selva, las *Voyria* eran una señal de la presencia de redes fúngicas compartidas que

funcionaban; los *micohets* solo podían sobrevivir si *hackeaban* las Wood Wide Webs. Sin tener que recurrir a experimentos complicados, las *Voyria* me permitían calibrar si se estaban transfiriendo cantidades significativas de carbono entre plantas. Y la idea se me ocurrió hablando con unos amigos en Oregón que salían a buscar setas *matsutake*. Resulta que las *matsutake* son los cuerpos fructíferos de un hongo micorrícico y, a veces, son recogidos antes de que empiecen a empujar por el suelo del bosque. Y suele ser una buena pista sobre dónde empezar a mirar. Las *matsutake* se asocian con un pariente *micohet* de las *Monotropa* que tiene un tallo a rayas blancas y rojas, conocido como «bastones de caramelo» *(Allotropa virgata)*. Los bastones de caramelo se asocian exclusivamente con *matsutake*, y su presencia es un indicador tan seguro de hongo *matsutake* incipiente como lo es la propia seta *matsutake*. Los bastones de caramelo, como muchos *micohets*, vienen a ser como periscopios en el subsuelo micorrícico.[14]

Al ser tan seductores, los *micohets* siempre han sido considerados como indicadores. Si los bastones de caramelo son indicadores literales, utilizados por los buscadores de *matsutake* para ubicar redes subterráneas de hongos *matsutake*, las *Monotropa* sirvieron como un indicador conceptual para biólogos. Así como los líquenes fueron el organismo de entrada a la noción de simbiosis, las *Monotropa* fueron el organismo de entrada a las redes micorrícicas compartidas. Su peculiar aspecto sugería que el material podría pasar entre plantas a través de conexiones fúngicas compartidas en cantidades lo suficientemente grandes para sustentar todo un estilo de vida.

En todos los sistemas físicos, la energía se mueve ‘cuesta abajo’, desde donde hay más a donde hay menos. El calor viaja desde el sol candente al espacio frío. El perfume de una trufa va a la deriva desde zonas de alta concentración a otras de baja concentración. En ninguno de estos casos hace falta un transporte activo. Mientras haya una pendiente energética, la energía se moverá desde la ‘fuente’ (lo más alto) al ‘sumidero’ (lo más bajo). Lo que más importa es cuán empinado es el desnivel entre los dos.

En muchos casos, la transferencia de recursos a través de redes micorrícicas se produce cuesta abajo, desde las plantas más grandes a las más pequeñas. Las primeras suelen tener más recursos, sistemas de raíces más desarrollados y mejor acceso a la luz. Dichas plantas son fuentes para las plantas más pequeñas, que

crecen a la sombra con sistemas de raíces menos desarrollados. Y las plantas más pequeñas son sumideros. Las orquídeas que toman ahora y pagan después empiezan siendo sumideros y cuando se hacen adultas se convierten en fuentes. *Micohets* como la *Monotropa* y la *Voyria* son siempre sumideros.[15]

El tamaño no lo es todo. La dinámica fuente-sumidero puede cambiar, en función de la actividad de las plantas conectadas. Cuando Simard puso a la sombra a sus plántulas de abeto –reduciendo su capacidad para hacer la fotosíntesis y convirtiéndolas así en sumideros de carbono más fuertes–, estas recibieron más carbono de sus abedules ‘donantes’. En otro experimento, los investigadores siguieron el paso de fósforo desde las raíces de plantas moribundas a las de plantas saludables próximas con las que compartían una red fúngica. Las plantas moribundas eran fuentes de nutrientes, y las plantas vivas eran sumideros.[16]

En otro estudio sobre abedules y abetos de Douglas en bosques canadienses, la dirección de la transferencia de carbono cambió *dos veces* durante el curso de una sola temporada de crecimiento. En primavera, cuando el abeto –árbol de hoja perenne– estaba haciendo la fotosíntesis y el abedul, desprovisto de hojas, empezaba a brotar, este último se comportaba como un sumidero y recibía el carbono procedente del abeto. En verano, cuando el abedul tenía todo el follaje, y el abeto se hallaba en el sotobosque a la sombra, la dirección del flujo de carbono cambió, moviéndose cuesta abajo del abedul al abeto. En otoño, cuando el abedul empezó a perder hojas, los árboles volvieron a intercambiarse los roles, y el carbono se desplazó cuesta abajo del abeto hasta el abedul. De esta manera, los recursos pasaban de zonas de abundancia a zonas de escasez.[17]

Estos comportamientos suponen un rompecabezas. Para simplificar, el problema es este: ¿Por qué las plantas dan recursos a un hongo que va a seguir dándoselos a una planta vecina –un competidor potencial–? A primera vista, parece un ejemplo de altruismo. Pero la teoría evolutiva no encaja con el altruismo, porque el comportamiento altruista beneficia al receptor en perjuicio del donante. Si una planta donante ayuda a un competidor perjudicándose a sí misma, es menos probable que sus genes pasen a la siguiente generación. Si los genes del altruista no pasan a la generación siguiente, el comportamiento altruista pronto desaparecerá.[18]

Hay bastantes caminos que rodean este callejón sin salida. Uno se basa en la idea de que las plantas donantes no sufrirán verdaderamente un ‘daño’. Un

gran número de plantas tienen mucho acceso a la luz. Para ellas, el carbono no es un recurso reducido. Si el carbono sobrante de una planta pasa a una red micorrícica donde se convierte en un 'bien público' que disfrutan muchos, la acusación de altruismo se puede evitar porque ninguna –ni la donante, ni la receptora– debe pagar el precio. Otra posibilidad es que *ambas*, la planta emisora y la receptora, se benefician, pero en momentos diferentes. Una orquídea podría 'tomar ahora', pero si 'paga después', entonces el precio no recae de manera exclusiva sobre nadie. Un abedul se beneficia del carbono que recibe de un abeto en primavera pero el abeto seguramente se beneficiará del carbono que recibirá del abedul en pleno verano, cuando se halle en el sotobosque a la sombra.[19]

Hay otras consideraciones. En términos evolutivos, podría ser beneficioso para una planta el ayudar a un pariente cercano al pasar sus genes aunque le genere un daño –un fenómeno conocido como «selección de parentesco»–. Algunos ensayos han investigado esta posibilidad al comparar la cantidad de carbono que pasa entre parejas de plántulas hermanas de abeto de Douglas, y parejas de plántulas sin parentesco alguno. Como cabría imaginar, el carbono se transfirió cuesta abajo, desde una planta donante grande a otra receptora más pequeña. Pero en algunos casos, pasaba más carbono entre hermanados que entre desconocidos: los hermanados parecían compartir más conexiones fúngicas que los desconocidos, teniendo así más vías para que el carbono se moviera entre ellos.[20]

Lo más rápido para diluir este rompecabezas es cambiar de perspectiva. En todas estas historias sobre redes micorrícicas compartidas salta a la vista que las plantas son las protagonistas. Los hongos aparecen porque conectan plantas y sirven como un conducto entre ellas. Se convierten en poco más que un sistema de cañerías que las plantas pueden usar para bombear material entre ellas.

Esto es centrismo vegetal, sin más.

Tener un punto de vista vegetal centrista puede dar una visión distorsionada. Prestar más atención a los animales que a las plantas contribuye a la ceguera de los seres humanos por las plantas. Prestar más atención a las plantas que a los hongos nos provoca que seamos ciegos frente a los hongos. «Creo que mucha gente profundiza en estas redes más de lo que debería –me dijo Marc-André Selosse–. Algunas personas hablan de árboles que se benefician de una seguridad social o retiro, describen árboles jóvenes que viven

en viveros, y dicen que la vida es fácil y económica para los árboles que viven en un grupo. Discrepo con estos puntos de vista porque retratan a los hongos como meras tuberías. Y no es así. El hongo es un organismo vivo con sus propios intereses. Es una pieza activa del sistema. Quizá como es más fácil investigar a las plantas que a los hongos, mucha gente adopta un punto de vista de la red muy centrado en las plantas.»

Estoy de acuerdo. Seguramente nos tropezamos con el centrismo de las plantas porque las plantas tienen una relevancia más obvia en nuestras vidas. Las podemos tocar y probar. Los hongos micorrícicos son evasivos. Y la terminología de la Wood Wide Web tampoco ayuda. Es una metáfora que nos empuja hacia el centrismo vegetal al insinuar que las plantas son el equivalente a las páginas web, o nodos, en la red, y los hongos son los hipervínculos que unen los nodos entre sí. En terminología del *hardware* del que se compone internet, las plantas son los rúters y los hongos, los cables.

De hecho, los hongos distan mucho de ser cables pasivos. Tal y como hemos visto, las redes de micelio pueden resolver complejos problemas espaciales, y han perfeccionado solas una capacidad para transportar sustancias. Aunque el material suele moverse por las redes fúngicas cuesta abajo, de la fuente al sumidero, el transporte raras veces se da solo por difusión pasiva: es demasiado lento. Los ríos de fluido celular que fluyen por las hifas de los hongos permiten el transporte rápido, y aunque estos flujos están gobernados, en última instancia, por dinámicas de fuente-sumidero, los hongos pueden dirigir el flujo al aumentar, densificar y podar partes de la red –o lo que es más, fusionarse totalmente con otra red–. Sin la capacidad de regular el flujo en sus redes, buena parte de la vida de los hongos –también el crecimiento exquisitamente coreografiado de las setas– sería imposible.

Los hongos pueden gestionar de otras maneras el transporte por sus redes. Como sugieren los ensayos de Toby Kiers, los hongos tienen cierto grado de control sobre sus patrones negociadores –ya sea ‘recompensando’ a más socios vegetales cooperativos, ‘acaparando’ minerales en sus tejidos o moviendo recursos por sí mismos para optimizar la ‘tarifa de cambio’ que obtienen–. En el estudio de Kiers sobre la desigualdad de recursos, el fósforo se movía cuesta abajo desde zonas donde abundaba a otras donde escaseaba, pero lo hacía mucho más deprisa de lo que la difusión pasiva le permitiría –probablemente transportado al utilizar ‘motores’ microtubulares de los hongos–. Estos sistemas

de transporte activos permiten a los hongos transportar material por sus redes en cualquier dirección –incluso en ambas direcciones a la vez– independientemente de la pendiente entre la fuente y el sumidero.[21]

La Wood Wide Web es una metáfora problemática por otras razones. La idea de que hay un solo tipo de Wood Wide Web es engañosa. Los hongos crean redes enmarañadas tanto si conectan plantas como si no lo hacen. Las redes micorrícicas compartidas son solo un caso especial –las redes fúngicas en las que las plantas se hallan enmarañadas–. Los ecosistemas están plagados de redes de micelio fúngico no micorrícico que cosen organismos a una relación. Los hongos descomponedores que Lynne Boddy estudia, por ejemplo, abarcan extensos ecosistemas y vinculan hojas en descomposición con ramitas caídas, grandes tocones putrefactos con raíces en descomposición, como hacen las redes del hongo de miel, que baten el récord mundial al extenderse durante kilómetros. Estos hongos forman Wood Wide Webs de otro tipo: redes basadas en el consumo de plantas, y no en su sustento.

Cualquier enlace en una Wood Wide Web es un hongo con vida propia. Es un pequeño detalle que marca una gran diferencia. Todo cambia cuando consideramos a los hongos como participantes activos. Al incluir al hongo en el relato podemos adoptar un punto de vista más fúngico que es útil para preguntar qué intereses sirven las redes micorrícicas compartidas. ¿Quién se beneficia?

Un hongo micorrícico que puede mantener varias de sus plantas vivas está en una posición ventajosa: tener una cartera con varios socios vegetales le asegura frente a la muerte de uno de ellos. Si un hongo depende de varias orquídeas y una de ellas no le puede suministrar carbono hasta alcanzar la edad adulta, el hongo mantendrá a la orquídea joven mientras crece –para dejarla ‘tomar ahora’– siempre y cuando ‘pague después’. Con una visión mico-céntrica, se evita el problema del altruismo. Además, coloca a los hongos en primera fila y en el centro: brókeres del enmarañamiento capaces de arbitrar las interacciones entre plantas según sus propias necesidades fúngicas.

Independientemente de si tomamos un punto de vista mico-céntrico o vegeto-céntrico, hay muchas situaciones donde compartir una red micorrícica proporciona claros beneficios a las plantas implicadas: en general, las plantas que comparten una red con otras crecen más deprisa y sobreviven mejor que las plantas vecinas que son excluidas de la red común. Estos descubrimientos han

alimentado las visiones de las Wood Wide Webs como lugares de cariño, convivencia compartida y ayuda mutua a través de los cuales las plantas pueden liberarse de las rígidas jerarquías de competición por los recursos. Estas interpretaciones recuerdan las románticas fantasías que, en pleno fervor de la década de 1990, se veía internet como una vía de escape de las rígidas estructuras de poder del siglo XX y una entrada a la utopía digital.[22]

Los ecosistemas, como las sociedades humanas, difícilmente son tan unidimensionales. Investigadores como David Read tienen la sensación de que las visiones utópicas que se dan al suelo son una proyección descarada de los valores humanos en un sistema no humano; otros, como Toby Kiers, argumentan que las visiones humanas ignoran las muchas maneras en las que la colaboración siempre es una aleación de competición *y* colaboración. El problema principal para la mico-utopía es que, como pasa con internet, las redes micorrícicas compartidas no son siempre beneficiosas. Las Wood Wide Webs son complejos amplificadores de las interacciones de plantas, hongos y bacterias.

La mayoría de estudios que han revelado que las plantas se benefician de su implicación con redes micorrícicas compartidas se han llevado a cabo en climas templados con árboles que establecen relaciones con un tipo particular de hongo micorrícico llamado «ectomicorrícico». Otros tipos de hongo micorrícico se comportan de forma diferente. En algunos casos, parece que no haya mucha diferencia entre una planta que tiene su red fúngica privada y otra que la comparta con otras plantas, aunque en el segundo caso el hongo obtiene mayores beneficios porque puede acceder a un mayor número de socios vegetales. Hay casos en los que pertenecer a una red compartida puede ser desventajoso para las plantas. Los hongos controlan el abastecimiento de minerales que obtienen del suelo y pueden negociar preferentemente estos nutrientes con sus socias vegetales más grandes, que son fuentes más abundantes de carbono y sumideros más fuertes para los minerales del suelo. Estas asimetrías pueden dar una mayor ventaja competitiva a las plantas más grandes sobre las más pequeñas que comparten la red. En estas situaciones, las plantas más pequeñas empiezan a beneficiarse solo cuando se cortan sus conexiones a la red, o cuando las plantas más grandes que comparten la red –y que han estado extrayendo cantidades desproporcionadas de nutrientes– se ven restringidas.[23]

Las redes micorrícicas compartidas pueden tener incluso consecuencias más ambiguas. Algunas especies vegetales producen sustancias químicas para impedir el crecimiento o matar a plantas que hay cerca. En condiciones

normales, el paso de estas sustancias químicas a través del suelo es lento y no siempre alcanzan concentraciones venenosas. Las redes micorrícicas pueden ayudar a vencer estas limitaciones, en algunos casos proporcionando un 'carril fúngico rápido' o 'autopista' para las plantas que emiten elementos disuasorios venenosos. En un experimento, un compuesto venenoso liberado por las hojas caídas de nogales pudo viajar por redes micorrícicas y acumularse en las raíces de tomateras, reduciendo su crecimiento.[24]

En otras palabras, las Wood Wide Webs son mucho más que el movimiento de recursos –sean carbohidratos, nutrientes o agua–. Las redes micorrícicas compartidas pueden pasar, además de venenos, las hormonas que regulan el crecimiento y el desarrollo de las plantas. En muchas especies de hongo, los núcleos que contienen el ADN y demás elementos genéticos como virus o ácido ribonucleico son libres de viajar por el micelio, dando a entender así que el material genético se podría transferir entre plantas por un canal fúngico –aunque son posibilidades que apenas se han estudiado.[25]

Una de las propiedades más sorprendentes de las Wood Wide Webs es la forma en la que envuelven a otros organismos aparte de las plantas. Las redes fúngicas proporcionan carreteras a las bacterias para que migren por la pista de obstáculos que es el suelo. En algunos casos, las bacterias depredadoras se valen de las redes de micelio para perseguir y atrapar a su presa. Algunas bacterias hacen vida en las hifas de los hongos, y realzan su crecimiento, estimulan sus metabolismos, producen vitaminas clave e incluso influyen en las relaciones de los hongos con sus socias vegetales. Una especie de hongo micorrícico, la colmenilla *(Morchella crassipes),* lo que hace es cultivar las bacterias que viven en sus redes: el hongo 'planta' poblaciones de bacterias y después las cuida, cosecha y consume. En toda la red el trabajo se reparte, unas partes del hongo se encargan de producir alimento y otras, de consumirlo.[26]

Hay incluso posibilidades más extravagantes. Las plantas despiden toda suerte de sustancias químicas. Cuando los áfidos atacan las habas, por ejemplo, estas liberan desde la herida columnas de compuestos volátiles que atraen a avispas parasitoides que apresan al áfido. Estos «infoquímicos» –llamados así porque transportan información sobre el estado de la planta– son una de las maneras que tienen las plantas para comunicarse entre diferentes partes de sus cuerpos pero también con otros organismos.

¿Podrían las plantas transferirse infoquímicos bajo tierra a través de redes fúngicas compartidas? Dicha cuestión empezó a interesar a Lucy Gilbert y David Johnson, que entonces trabajaban en la Universidad de Aberdeen, en Escocia. Para averiguarlo, llevaron a cabo un logrado experimento: permitieron que las habas estuvieran conectadas a una red micorrícica compartida o les impidieron estarlo utilizando para ello una fina malla de nailon. La malla permitió que el agua y las sustancias químicas pasaran pero impidió el contacto directo entre los hongos conectados a plantas diferentes. Una vez ya crecidas las plantas, se permitió que los áfidos atacaran las hojas de una de las plantas de la red. Para bloquear la difusión de infoquímicos por el aire colocaron bolsas de plástico encima de las plantas.[27]

De esta manera, Gilbert y Johnson confirmaron su hipótesis: las plantas que estaban conectadas a la planta infestada de áfidos por una red fúngica compartida incrementaron su producción de compuestos defensivos volátiles, aunque ellas no tuvieran áfidos. Las nubes de compuestos volátiles producidas por las plantas eran lo bastante grandes como para atraer a las avispas parasitoides, dando a entender que la información transferida entre plantas por el canal fúngico podría marcar la diferencia en un entorno del mundo real. Gilbert me lo describió como un descubrimiento «totalmente inédito» porque revelaba un papel hasta entonces desconocido de las redes micorrícicas compartidas. Una planta donante no solo influía en una receptora, sino que su influencia podía trascender más allá de la receptora con la ayuda de sustancias químicas volátiles. Una red micorrícica compartida influía no solo en la relación entre dos plantas, sino también en la relación entre las dos plantas, sus plagas de áfidos y sus avispas aliadas.[28]

A partir del 2013 quedó claro que el hallazgo de Gilbert y Johnson no es una anomalía. Se ha observado un fenómeno similar en las tomateras atacadas por orugas, y entre plántulas de abetos de Douglas y pinos atacados por gusanos. Estos ensayos aportan nuevas probabilidades. Muchos de los investigadores con los que he hablado comparten el punto de vista de que la comunicación entre plantas a través de redes fúngicas es uno de los aspectos más convincentes del comportamiento de las micorrizas. Sin embargo, los buenos experimentos arrojan más preguntas de las que responden. «¿A qué responden las plantas en realidad? ¿Qué es lo que en realidad *hace* el hongo?», reflexiona Johnson.[29]

Una hipótesis plantea que los infoquímicos pasan entre plantas a través de redes fúngicas compartidas. Y esto parece lo más probable porque las plantas

utilizan infoquímicos para comunicarse en la superficie. Los impulsos eléctricos que pasan por las hifas de los hongos son otra probabilidad interesante. Tal y como Stefan Olsson y sus colegas neurocientíficos descubrieron, el micelio de algunos hongos –también el del hongo micorrícico– puede transportar impulsos de actividad eléctrica que son sensibles a la estimulación. Las plantas también utilizan señales eléctricas para comunicarse entre sus diferentes partes. Nadie ha investigado si las señales eléctricas pueden pasar de la planta al hongo y después a la planta, aunque sería lo lógico. Sin embargo, Gilbert es muy clara: «No lo sabemos. Que esas señales existen es un descubrimiento nuevo. Estamos muy al comienzo de una nueva área de investigación». Para ella, identificar la naturaleza de la señal es prioritario. «Sin saber a qué responden las plantas, no podemos responder a preguntas sobre cómo se controla la señal, o cómo se manda, en realidad.»[30]

¡Hay tanto por descubrir! Si la información puede pasar a redes fúngicas que comunican pequeñas habas en macetas en un invernadero, ¿qué sucede en ecosistemas naturales? Comparado con el clamor de las pistas y señales químicas que se transmiten entre plantas por el aire, ¿es grande el papel que desempeñan los caminos fúngicos? ¿Puede ir muy lejos la información que viaja bajo tierra por las redes fúngicas? Johnson y Gilbert están llevando a cabo experimentos donde enlazan varias plantas en 'cadena' para ver si la información puede pasar de planta a planta en un sistema de repetición. Las consecuencias ecológicas podrían ser profundas pero Johnson se mantiene cauto. «De repente, extrapolar los descubrimientos en un laboratorio a bosques enteros de árboles que hablan y se comunican entre sí es un poco excesivo –me dijo–. La gente va muy deprisa extrapolando las conclusiones de un comportamiento de una planta en una maceta y aplicándolo a un ecosistema entero.»

Lo que se transfiere exactamente entre plantas por las redes fúngicas es una cuestión peliaguda para los científicos que estudian las Wood Wide Webs. Y esta falta de conocimientos nos lleva a callejones conceptuales sin salida. Por ejemplo, sin saber cómo se pasa la información entre plantas, es imposible saber si las plantas donantes 'envían' los mensajes de advertencia de forma activa o si las plantas receptoras se limitan a 'espiar' el estrés de sus vecinas. Si el escenario fuera de 'espionaje', no hay nada en el comportamiento de la emisora que nos haga pensar en un comportamiento deliberado. Como Toby Kiers

explicó, «si un árbol es atacado por un insecto, por supuesto que va a chillar en su idioma: producirá algún tipo de sustancia química para prepararse para el ataque». Estas sustancias químicas podrían fácilmente derramarse de una planta a otra por la red. Nada *se manda* de forma activa. La planta receptora simplemente se da cuenta. David Johnson utiliza la misma analogía. Si escuchamos chillar a alguien, eso no significa que chilla *para* avisarnos de algo. Vale, un grito puede modificar nuestro comportamiento, pero no significa que el que grita tenga alguna intención. «Tú te limitas a espiar su reacción a una situación determinada.»

Puede parecer que hile muy fino, pero mucho puede cambiar según como interpretemos la interacción. En cualquier caso, un estímulo pasa de una planta a otra y permite al receptor prepararse para el ataque. No obstante, si las plantas mandan un mensaje, deberíamos considerarlo como una señal. Si sus vecinas espían, deberíamos considerarlo como una pista. Cómo interpretar mejor el comportamiento de las redes micorrícicas compartidas es un tema delicado. A algunos investigadores les preocupa cómo se retrata habitualmente a las Wood Wide Webs. «Solo porque hayamos descubierto que las plantas pueden responder a un vecino –me dijo Johnson– eso no significa que haya una red de tipo altruista.» La idea de que las plantas se hablan y se avisan entre ellas de un ataque inminente es una ilusión antropomórfica. «Es muy atractivo pensar así», admitió, pero en el fondo constituye «un montón de tonterías».[31]

La metáfora del grito quizá no ayude mucho porque se puede interpretar de dos maneras. Los seres humanos gritan cuando están en peligro, reciben un impacto, están emocionados o sienten dolor. Y también gritan para alertar a otros seres humanos de un peligro. No siempre es fácil desentrañar la causa y el efecto, aunque se pregunte directamente al ser humano que está en peligro. Pero con las plantas es aún más difícil. Quizá la pregunta peliaguda de si las plantas se avisan entre sí de un ataque de áfidos, o solo se limitan a espiar los alaridos químicos de sus vecinas, es lo que no hay que preguntar. Tal y como Kiers observó, «tenemos que revisar el discurso que mantenemos. Ojalá pudiera pasar del lenguaje e intentar entender el *fenómeno*». Una vez más, resultaría más provechoso preguntar el por qué este comportamiento ha evolucionado. ¿Quién sale ganando?

Con toda certeza, el haba receptora se beneficia del aviso: la planta activa sus defensas antes de que llegue el áfido. Pero, ¿qué gana el haba emisora avisando a sus vecinas? Y aquí estamos otra vez con el problema del altruismo.

Y de nuevo, la salida más rápida del laberinto es cambiar de perspectiva. ¿Qué gana un *hongo* pasando un aviso entre las muchas plantas con las que vive?

Si un hongo está conectado a varias plantas y los áfidos atacan a una de ellas, el hongo va a sufrir igual que la planta. Si una mata entera de plantas pasa a un estado de alerta máxima, producirá una nube de sustancias químicas mayor que la que pueda emitir una sola planta. Cualquier hongo que pueda aumentar el faro químico se beneficiará de su capacidad para hacerlo –y claro, la planta también se beneficia, pero sin generar un coste–. De manera similar, cuando las señales de estrés pasan de una planta enferma a otra sana, es el hongo el que sale ganando al mantener viva a la planta sana. «Imagínate que en un bosque tienes árboles que parece que den recursos a otros árboles –me explicó Gilbert–. Me parece mucho más probable que el hongo se dé cuenta de que el árbol A está un poco enfermo, y que el árbol B no lo está, y de este modo transporta más recursos al árbol A. Si adoptas un punto de vista mico-céntrico todo adquiere mayor sentido.»

La mayoría de estudios sobre redes micorrícicas compartidas se reducen a *parejas* de árboles. David Read vio cómo la radioactividad pasaba de las raíces de una planta a otra. Simard rastreó marcadores radioactivos de una planta donante a otras receptoras. Solo limitando a un número reducido de plantas es posible realizar este tipo de experimentos. Pero las Wood Wide Webs se expanden decenas o cientos de metros, y posiblemente más. Entonces ¿qué ocurre? Hay que fijarse en lo que pasa en el mundo exterior: árboles, arbustos, hierba, parras, flores. Quién está conectado con qué, ¿y cómo? ¿Cómo sería un mapa de una Wood Wide Web?

Sin conocer la arquitectura de las redes fúngicas compartidas, es difícil entender qué sucede en su interior. Sabemos que los recursos y los infoquímicos se mueven por las redes cuesta abajo, desde la abundancia a la escasez, pero no todo puede reducirse a fuentes y sumideros. Tu corazón es una bomba que hace que la sangre fluya ‘cuesta abajo’, al crear zonas de presión alta y zonas de presión baja. La dinámica de fuente-sumidero puede explicar el por qué la sangre circula pero no el por qué llega a tus órganos tal y como lo hace. Esto tiene que ver con los vasos sanguíneos: su grosor, cómo están ramificados y el

recorrido que siguen por nuestro cuerpo. Algo parecido pasa con las redes micorrícicas. El material no puede pasar por su interior siguiendo la dinámica de fuente a sumidero a menos que haya una red interna por la que fluir.

Kevin Beiler, un exalumno de Simard, es el autor principal de los dos únicos estudios que, a finales de la década del 2000, intentaron mapear la estructura espacial de una red micorrícica compartida. Beiler escogió un ecosistema relativamente sencillo –un bosque de abetos de Douglas de diferentes edades en Columbia Británica– y empleó una técnica utilizada en pruebas de paternidad en seres humanos: en una parcela de 30 x 30 m, identificó las huellas genéticas de cada individuo de hongo y de árbol que le permitieron resolver exactamente quién estaba asociado con quién. El nivel de detalle conseguido es inaudito. Muchos ensayos se han fijado en qué especies de plantas y de hongos interactúan entre sí, pero pocos van más allá y preguntan qué individuos están conectados entre sí.[32]

Los mapas de Beiler son impresionantes. Las redes de hongos se expanden a más de 10 m pero los árboles no están conectados uniformemente. Los árboles jóvenes tienen pocas conexiones, y los adultos, muchas. El árbol mejor conectado comunica con 47 árboles pero conectaría con otros 250 más si se hubiera ampliado la parcela acotada. Si uno utiliza un dedo para saltar de árbol en árbol en la red –que es, por supuesto, un gesto vegeto-centrista–, no se desplaza por el bosque uniformemente sino que cruza la red saltando por un número reducido de árboles adultos bien conectados. Y es a través de estos ‘nodos’ que se puede llegar a cualquier árbol en menos de tres pasos.

En 1999, cuando Barabási y sus colegas publicaron el primer mapa de la World Wide Web, descubrieron un patrón similar. Las páginas web estaban conectadas a otras páginas web, pero no todas tienen el mismo número de enlaces. La inmensa mayoría tienen solo algunas conexiones, pocas. Hay un número pequeño de páginas que están tremendamente bien conectadas. Y existe un abismo entre las páginas con el mayor número de enlaces y las que tienen el menor número de enlaces: aproximadamente el 80% de los enlaces en la Red señala al 15% de páginas. Lo mismo ocurre con otros tipos de redes –desde las rutas aéreas a nivel mundial a las redes neuronales del cerebro–. En todos los casos, los nodos bien conectados permiten atravesar la red en pocos pasos. En parte son estas propiedades de una red –conocidas como propiedades «libres de escala»– las que permiten que las enfermedades, noticias y modas se expandan masivamente entre la población. Y son dichas propiedades libres de escala las

que, en una red micorrícica compartida, permiten a una planta joven sobrevivir en un sotobosque muy umbrío, o a los infoquímicos propagarse por una arboleda en un bosque. «Un árbol joven enseguida queda amarrado a una red compleja, entretejida y estable –me explicó Beiler–. Y tú esperas que esto aumente sus posibilidades de supervivencia y la resiliencia del bosque.» Pero solo hasta cierto punto porque estas mismas propiedades libres de escala hacen que una Wood Wide Web sea vulnerable a ataques objetivos. Si eliminas Google, Amazon y Facebook de la noche a la mañana o cierras los tres aeropuertos más transitados del mundo, sembrarás el caos. Si retiras de forma selectiva los grandes árboles nodales –como ya hacen muchas empresas madereras al extraer la madera más valiosa–, producirás una alteración grave.[33]

Aquí no hay leyes fundamentales que valgan. Las propiedades libres de escala suelen aparecer en cualquier red que crece. «La mayoría de redes que aparecen en el mundo son el resultado de algún tipo de proceso de crecimiento», me explicó Barabási. Un nodo nuevo tiene más maneras de conectar con un nodo bien conectado que con otro no tan bien conectado. Por consiguiente, los nodos viejos con muchos enlaces acaban teniendo más enlaces, si cabe. Tal y como Beiler dice, «tú puedes ver estas redes micorrícicas como un proceso *contagioso*. Tiene algunos árboles fundadores y la red crece a partir de ahí. Los árboles con más enlaces a otros árboles suelen acumular más enlaces, y más deprisa».

¿Significa esto que la arquitectura de las Wood Wide Webs será similar en otras partes del mundo? Es posible, pero no hemos mapeado suficientes redes para estar seguros. Extrapolar los descubrimientos obtenidos con una planta en una maceta a todo un ecosistema conlleva algunos problemas; y extrapolar los descubrimientos obtenidos en una parcela de 30 x 30 m no es un problema menor. Hay muchas maneras diferentes de ser una planta y muchas maneras diferentes de ser un hongo. Hay plantas que pueden establecer relaciones con miles de especies de hongos, y otras que establecen relaciones con menos de 10 formando redes con miembros exclusivos de su propia especie. Algunos tipos de hongo tienen micelio que fácilmente se injerta en otras redes de micelio para formar grandes redes compuestas, y otros es más probable que se aíslen. En Panamá descubrí que las *Voyria* dependían solo de una única especie de hongo pero que su especialidad distaba mucho de ser limitativa: el socio de las *Voyria* era el hongo micorrícico más abundante del bosque y establecía relaciones con todas las especies de árbol permitiendo a las *Voyria* conectar con el mayor

número posible de plantas distintas. En el mismo bosque crecían otros *micohets* que habían desarrollado otra estrategia y se asociaban con una gran variedad de especies de hongos.[34]

Incluso en la pequeña parcela de bosque que Beiler escogió estudiar –en parte por su sencillez– nos perdemos muchas piezas del rompecabezas. Sus mapas muestran cómo están dispuestos los árboles y los hongos, pero no sabemos qué *hacían* en realidad. «Solo observé una especie de árbol y dos especies de hongo, ni mucho menos me acerqué a toda la comunidad –reflexionó–. Fue solo un atisbo; una ventanita a un sistema vasto y abierto. Solo pude describir a *grosso modo* la verdadera red social del bosque.»

Las *Voyria* han perdido la capacidad para formar complejos sistemas de raíces. No los necesitan; sus redes fúngicas compartidas son sus raíces. Las *Voyria* tienen un agrupamiento de dedos carnosos allí donde antes había raíces. Si se las disecciona, se ven hifas enrollándose y estallando en las células de las *Voyria*. A veces, sus raíces ni siquiera están bajo tierra, aparecen a ras de suelo como puños pequeños. Es fácil recogerlas. Sus conexiones con los hongos se rompen al momento. Qué extraño resulta cortar las líneas de vida de una planta con tan poco esfuerzo. La sujeción de las *Voyria* a su red es cuestión de vida o muerte y aun así los enlaces físicos son casi intangibles. A menudo me preguntaba cómo podía pasar todo el material que necesita una planta por corredores tan frágiles.

Como casi siempre que se investigan las redes micorrícicas, plantearse preguntas sobre las *Voyria* implicaba recogerlas y, por tanto, cortar sus conexiones a la red. Me pasé días haciéndolo. Y días pensando en lo irónico que era cortar precisamente las conexiones que estudiaba. Por supuesto, los biólogos suelen destruir los organismos que quieren entender. Ya estaba acostumbrado a esta idea, tanto como uno puede llegar a acostumbrarse. Pero amputar las conexiones a una red para estudiar la red parecía absurdo y no muy normal. Los físicos Ilya Prigogine e Isabelle Stengers decían que descomponer sistemas complejos no suele proporcionarnos aclaraciones satisfactorias; y pocas veces sabemos recolocar las piezas en su sitio. Las Wood Wide Webs plantean un desafío especial. Aún no sabemos cómo las redes de micelio coordinan su propio comportamiento y siguen en contacto consigo mismas, por no hablar de cómo gestionan sus interacciones con muchas plantas en suelos naturales. Sin embargo, sí que sabemos lo bastante para afirmar que las redes de micelio no

son *cosas* sino acontecimientos vivos. Sabemos que las redes de micelio pueden fusionarse entre sí y podarse, redirigir el flujo por sí mismas, y liberar –y reaccionar a– nubes de sustancias químicas. Sabemos que los hongos micorrícicos forman y reforman sus conexiones con plantas, enredándose, desenredándose y volviéndose a enredar. Sabemos, en pocas palabras, que las Wood Wide Webs son sistemas dinámicos en renovación maravillosa e incesante.[35]

A las entidades que se comportan de esta manera se las llama, en líneas generales, «sistemas adaptables complejos»: complejos porque su comportamiento es difícil de predecir si solo se conocen sus integrantes; adaptables porque se organizan a sí mismos en nuevas formas o comportamientos como reacción a sus circunstancias. Tú –como todos los organismos– eres un sistema adaptable complejo, como lo es la World Wide Web, como lo son los cerebros, las colonias de termitas, los enjambres de abejas, las ciudades y los mercados financieros, por citar solo algunos. En sistemas adaptables complejos, los cambios pequeños pueden provocar grandes efectos que solo se pueden ver observando el sistema en su totalidad. Pocas veces se puede trazar una flecha nítida entre «causa» y «efecto». Los estímulos –que, en sí mismos, pueden ser gestos corrientesprovocan reacciones a menudo sorprendentes. Un buen ejemplo de este tipo de proceso dinámico no lineal serían las caídas financieras; como lo son los estornudos y los orgasmos.[36]

Entonces, ¿cuál es la mejor manera para pensar sobre las redes micorrícicas compartidas? ¿Tratamos con un súper organismo? ¿Una metrópoli? ¿Un internet vivo? ¿Guarderías para árboles? ¿Socialismo en el suelo? ¿Mercados liberalizados de capitalismo tardío, con hongos que empujan en el salón de transacciones de una Bolsa forestal? ¿O quizá es feudalismo de los hongos, con señores micorrícicos que presiden las vidas de sus siervos vegetales para su propio beneficio? Todas las maneras son complicadas. Las preguntas que surgen a raíz de las Wood Wide Webs van mucho más allá de lo que permite este reducido elenco de personajes. Sin embargo, necesitamos herramientas imaginativas. Para entender de verdad el comportamiento de las redes micorrícicas compartidas en ecosistemas complejos –qué hacen en realidad en lugar de qué son capaces de hacer–, quizá tendremos que empezar a pensar en ellas en términos análogos a los que empleamos para entender otros sistemas adaptables complejos potencialmente mejor estudiados.

Simard establece paralelismos entre redes micorrícicas compartidas en los

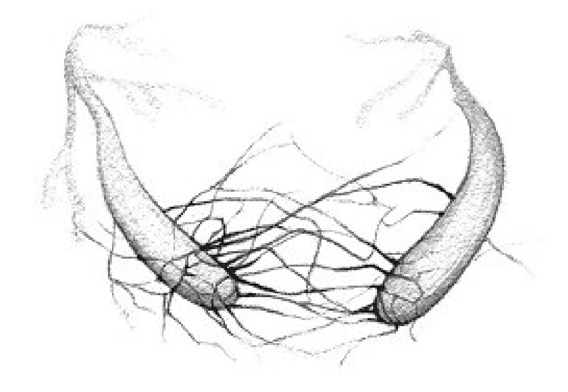
bosques y redes neuronales en cerebros animales. Argumenta que el campo de la neurociencia proporciona herramientas para entender mejor cómo surgen los comportamientos complejos en ecosistemas conectados por redes fúngicas. La neurociencia lleva más tiempo que la micología preocupada por cómo las redes dinámicas que se organizan a sí mismas pueden dar lugar a comportamientos adaptables complejos. Su punto de vista no es que las redes micorrícicas *son* cerebros. Hay innumerables maneras en las que ambos sistemas difieren. Para uno, los cerebros están formados por células que pertenecen a un solo organismo en lugar de a multitud de especies diferentes. Además, los cerebros están anatómicamente confinados y no pueden extenderse por un paisaje como sí pueden hacer las redes fúngicas. Sin embargo, la analogía es tentadora. Los desafíos a los que se enfrentan los científicos que estudian las Wood Wide Webs y los cerebros no son tan distintos, aunque la neurociencia lleva varias décadas y cientos de miles de millones de dólares invertidos de ventaja. «Los neurocientíficos cortan en rodajas el cerebro para mapear las redes neuronales –me dijo en broma Barabási–. Vosotros, los ecólogos, necesitáis rebanar un bosque para poder ver exactamente dónde están todas las raíces y los hongos, y quién conecta con quién.»[37]

Simard señala que parece haber algunos puntos de superposición informativos –aunque superficiales–. Las redes de actividad en el cerebro tienen propiedades libres de escala, con pocos módulos bien conectados que permiten que la información pase de A a B en pocos pasos. Los cerebros, como las redes fúngicas, se reconfiguran a sí mismos –o «rehacen la instalación para adaptarse»– como reacción a situaciones nuevas. Podan los caminos infrautilizados del mismo modo que el micelio poda las zonas que no utiliza mucho. Forman y fortalecen nuevas conexiones entre neuronas –o *sinapsis*–, como pasa con las conexiones entre hongos y las raíces de los árboles. Sustancias químicas conocidas como neurotransmisores pasan por las sinapsis, facilitando la transmisión de información entre nervios; de manera similar, las sustancias químicas pasan por las ‘sinapsis’ micorrícicas de un hongo a una planta o de una planta a un hongo, a veces transmitiendo información entre ellos. Es más, se sabe que los aminoácidos glutamato y glicina –importantes moléculas de señalización en plantas, y los neurotransmisores más comunes en los cerebros y médulas espinales de los animales– pasan entre plantas y hongos en estos cruces.[38]

Pero básicamente, los comportamientos de las Wood Wide Webs son

ambiguos, y establecer analogías con el cerebro –o con internet o con la política– es limitativo. Sin embargo, estas redes se autocoordinan, e independientemente de cómo esas pistas –¿o son señales?– pasan entre plantas por canales fúngicos, las Wood Wide Webs se solapan unas con otras y se deshilachan por sus cantos hacia fuera con intenciones inclusivas. Incluidas están las bacterias que migran de un sitio a otro por el micelio de los hongos. Incluidos están los áfidos y también las avispas parasitoides atraídas para el festín por los compuestos volátiles producidos por las habas. Si retrocedemos más, los seres humanos, también están incluidos. Sabiéndolo o no, hemos estado interactuando con redes micorrícicas el mismo tiempo que llevamos interactuando con las plantas.[39]

¿Somos capaces de desapegarnos de estas metáforas, de ser más originales y de aprender a hablar de las Wood Wide Webs sin apoyarnos en uno de nuestros tótems humanos más sobados? ¿Somos capaces de dejar que las redes micorrícicas sean preguntas, en lugar de respuestas que ya sabemos de antemano? «Yo solo intento mirar al sistema y dejar que el liquen sea un liquen.» Las conversaciones sobre las Wood Wide Webs a menudo me devuelven las palabras de Toby Spribille, el investigador que sigue descubriendo nuevos socios en la simbiosis de los líquenes. Las Wood Wide Webs no son líquenes; aunque pensar en ellas como líquenes enormes sobre los que andamos nos trae un soplo de aire fresco al repertorio de metáforas que actualmente tenemos. No obstante, me pregunto si podemos aprender algo de la paciencia de Spribille. ¿Somos capaces de coger distancia, mirar al sistema y dejar que la multitud polifónica de plantas, hongos y bacterias que forman nuestros hogares y nuestros mundos sean ellos mismos, y muy *diferentes* a cualquier otra cosa? ¿Cómo afectaría eso a nuestras mentes?



7

# MICOLOGÍA RADICAL

*Para hacer un buen uso del mundo, para dejar de desperdiciarlo y también el tiempo que pasamos en él, tenemos que reaprender lo que significa estar en él.*

**URSULA K. LE GUIN**

Estaba desnudo, enterrado bajo una pila de virutas de madera en descomposición que me llegaban hasta el cuello. Hacía calor y el vapor olía a cedro y a moho de libros de viejo. Me recosté, mientras sudaba bajo el peso mojado, y cerré los ojos.

Me encontraba en California, visitando uno de los pocos baños de fermentación que hay fuera de Japón. Las virutas de madera habían sido humedecidas y amontonadas en una pila. Se habían dejado en descomposición durante dos semanas y se habían depositado durante otra semana más en una gran tina de madera antes de mi llegada. Ahora el baño estaba en plena cocción, calentado únicamente por la virulenta energía de la descomposición.

El intenso calor me dejó adormilado, y pensaba en los hongos descomponiendo la madera. Que fácil es dar por sentado que todo se descompone cuando uno no se está cociendo bajo una pila de madera pudriéndose. Vivimos y respiramos en el espacio que ha dejado la descomposición. Sorbí ansioso con una caña un poco de agua fría de un vaso y parpadeé para apartar el sudor de mis ojos. Si pudiéramos detener por un momento la descomposición, desde este momento, el planeta acumularía kilómetros de profundidad en cuerpos. Lo veríamos como una crisis pero para los hongos sería un cúmulo enorme de oportunidades.

Mi modorra se agudizó. En realidad no era la primera vez que los hongos prosperaban en un período de dramática transformación global. Los hongos son curtidos supervivientes de la alteración ecológica. Su capacidad para agarrarse –y a menudo prosperar– en períodos de cambio catastrófico es una de las características que los definen. Son ingeniosos, flexibles y colaborativos. Con

tanta vida amenazada en la Tierra por culpa de la actividad del hombre, ¿podríamos asociarnos de alguna manera con los hongos para que nos ayuden a adaptarnos?

Esto quizá suene a delirantes elucubraciones de alguien enterrado hasta el cuello con virutas de madera en descomposición, pero cada vez hay más micólogos radicales que piensan exactamente lo mismo. Muchas simbiosis se han formado en épocas de crisis. El socio algar en un liquen no puede vivir de la piedra si no establece una relación con un hongo. ¿Quizá no podemos adaptar nuestra vida en un planeta dañado sin antes cultivar nuevas relaciones con los hongos?

En el período Carbonífero, hace 290-360 millones de años, las primeras plantas que generaron madera se expandieron por los trópicos en bosques cenagosos, con la ayuda de sus socios, los hongos micorrícicos. Estos bosques crecieron y murieron, soltando enormes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera. Y durante decenas de millones de años, casi toda esta materia vegetal no se descompuso. Se acumularon estratos de bosque muerto y sin pudrir, almacenando tanto carbono que los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera colapsaron, y el planeta entró en un período de enfriamiento global. Las plantas habían causado la crisis climática pero también se llevaron la peor parte: enormes zonas de bosque se extinguieron en un fenómeno conocido como el colapso de los bosques lluviosos del Carbonífero. ¿De qué forma la madera se convirtió en un contaminante que produjo el cambio climático?[1]

Desde una perspectiva vegetal, la madera fue, y sigue siendo, una maravillosa innovación estructural. A medida que las plantas prosperaban, empujaban con más fuerza y a mayor altura para alcanzar la luz, pero cuanto más altas eran, mayor era su necesidad de un soporte estructural. La madera fue la respuesta de las plantas a este problema. Hoy, la madera de unos tres billones de árboles –de los que se talan más de 15000 millones al año– constituye aproximadamente el 60% de la biomasa total de la Tierra, unas 300 gigatoneladas de carbono.[2]

La madera es un material híbrido. La celulosa –una característica de todas las células vegetales, ya sean leñosas o no– es uno de los ingredientes, y el polímero más abundante en la Tierra. La lignina es otro ingrediente, y el segundo más abundante. Y es la lignina lo que hace a la madera, madera. Es más

fuerte que la celulosa, y más compleja. Mientras la celulosa está formada por cadenas ordenadas de moléculas de glucosa, la lignina es una matriz desordenada de anillos moleculares.[3]

Hasta el día de hoy, solo algunos organismos, muy pocos, han resuelto cómo descomponer la lignina. El grupo más productivo es el de los hongos de la podredumbre blanca –llamados así porque al degradar la madera, la blanquean–. La mayoría de enzimas –catalizadores biológicos que los organismos vivos utilizan para acelerar reacciones químicas– se fijan a formas específicas de las moléculas. Frente a la lignina, esta fijación es imposible: su estructura química es demasiado irregular. Los hongos de la podredumbre blanca resuelven el problema al usar enzimas no específicas que no dependen de la forma. Estas «peroxidasas» liberan un torrente de moléculas altamente reactivas, conocidas como «radicales libres», que parten la estructura compacta de la lignina en un proceso conocido como «combustión enzimática».[4]

Los hongos son degradadores prodigiosos, pero uno de sus logros bioquímicos más impresionantes es esta capacidad de los hongos de la podredumbre blanca para descomponer la lignina de la madera. Gracias a su capacidad para liberar radicales libres, las peroxidasas de los hongos de la podredumbre blanca ejecutan lo que se conoce técnicamente como «química radical». Y «radical» es una palabra que le va al pelo porque estas enzimas han cambiado para siempre la forma de transitar del carbono por sus ciclos por la Tierra. Hoy, la descomposición fúngica –casi toda de materia vegetal leñosa– es una de las mayores fuentes de emisión de carbono a la atmósfera: unas 85 gigatoneladas de carbono al año. En el 2018, la combustión de combustibles fósiles por seres humanos emitió unas 10 gigatoneladas.[5]

¿De qué manera 10 millones de años de bosque se quedaron sin pudrir durante el Carbonífero? Hay opiniones para todos los gustos. Algunos apuntan a factores climáticos: los bosques tropicales estaban anegados con agua estancada y cuando los árboles morían, estos quedaban sumergidos en ciénagas anóxicas a las que los hongos de la podredumbre blanca no iban. Otros sugieren que cuando la lignina se desarrolló por primera vez en el período temprano del Carbonífero, dichos hongos eran incapaces de descomponerla porque aún no habían perfeccionado su sistema de descomposición; necesitaron otros siete millones de años más para perfeccionarlo.[6]

Entonces, ¿qué pasó con las enormes superficies de bosque que no se descompusieron? Es una cantidad de materia inconcebiblemente grande para

acumularse bajo tierra, a kilómetros de profundidad.

La respuesta es el carbón. La industrialización humana se ha alimentado de estas vetas de materia vegetal sin pudrir que, de algún modo, quedó fuera del alcance de los hongos. (Aunque si se les da la oportunidad, muchos tipos de hongos descomponen el carbón sin problema; tanto es así que hasta hay una especie conocida como el hongo «queroseno» que prospera en los tanques de combustible de los aviones.) El carbón es una mancha negra en el currículo de los hongos: es una prueba de ausencia fúngica, de lo que los hongos no digirieron. Raras veces desde entonces los hongos han dejado escapar tanto material orgánico.[7]

Sigo enterrado en hongos de la podredumbre blanca durante 20 minutos, cocido poco a poco por su química radical. Parece que el calor disuelva mi piel, apenas noto donde empieza y termina mi cuerpo; un abrazo complejo, unas veces dichoso, y otras, insoportable. No es de extrañar que el carbón pueda desprender semejante calor: está hecho de madera que aún no ha sido quemada. Cuando quemamos carbón, quemamos físicamente el material que los hongos fueron incapaces de quemar enzimáticamente. Descomponemos térmicamente lo que los hongos fueron incapaces de descomponer químicamente.

Puede parecer raro que los hongos hayan pasado por alto la madera, pero ya es más normal que nosotros hayamos pasado por alto los hongos. En el 2009, el micólogo David Hawksworth se refirió a la micología como una «megaciencia abandonada». Durante generaciones, la biología animal y la vegetal han tenido sus propios departamentos en la universidad, pero el estudio de los hongos se agrupó, hace mucho tiempo, con las ciencias de las plantas, y casi nunca ha sido reconocido como un campo distinto, ni siquiera hoy.[8]

Abandono es un término relativo porque, durante miles de años, los hongos han sido una importante fuente de alimento y medicinas en China. Hoy este país produce el 75% de la producción mundial de setas –casi 40 millones de toneladas–. En Europa central y oriental, los hongos también han desempeñado un importante papel cultural desde hace mucho tiempo. Si las muertes por envenenamiento de setas sirvieran para medir el entusiasmo de un país por los hongos, se podrían comparar las dos muertes como máximo que se producen en Estados Unidos al año con las 200 que se produjeron en Rusia y Ucrania el año 2000.[9]

Sin embargo, la observación de Hawksworth es válida para casi todo el mundo. El primer informe del State of the World's Fungi del 2018 revela que en la Lista Roja de Especies Amenazadas, recogida por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), solo se ha evaluado el estado de conservación de 56 especies de hongos, comparadas a las más de 25000 de plantas y a las más de 68000 de animales. Para solventar esta omisión, Hawksworth propone varias soluciones pero destaca una: «Se deberían aumentar los recursos necesarios para empoderar a los micólogos '*amateur*'». Sus comillas simples ya lo dicen todo. Aunque muchos campos científicos tienen redes de profesionales *amateur* con mucho talento y dedicación, las de la micología son especialmente notorias porque, con demasiada frecuencia, no ha habido otra salida para la investigación de los hongos.[10]

Un movimiento científico de base tal vez suena a inverosímil pero nace de una rica tradición. El estudio académico 'profesional' de organismos vivos cobró impulso hace muy poco, en el siglo XIX. La ciencia ha conseguido muchos de sus grandes logros gracias al entusiasmo de personas *amateur* que los han llevado a cabo fuera de los departamentos universitarios especializados. Hoy, tras un largo período de especialización y profesionalización, se puede hacer ciencia de muchas maneras. Los «proyectos de ciencia ciudadana», junto con los «*hackerspaces*» y «*makerspaces*» (*), se han popularizado mucho desde la década de 1990, permitiendo que personas no especialistas pero entregadas realicen proyectos de investigación. ¿Cómo llamaríamos a estos practicantes? ¿Se pueden contar como 'público'? ¿Ciudadanos científicos? ¿Expertos profanos? ¿O solo *amateurs*?[11]

Peter McCoy es artista de *hip hop*, micólogo autodidacta y fundador de una organización llamada Radical Micology que trabaja para desarrollar soluciones fúngicas a los muchos problemas tecnológicos y ecológicos que nos afectan. Tal y como explica en su libro *Radical Mycology* –híbrido de manifiesto fúngico, guía y manual del cultivador–, su objetivo es crear un «movimiento micológico del pueblo»; el libro versa sobre «el cultivo de hongos y las aplicaciones de la micología».

Radical Mycology es parte de un movimiento más amplio de micología autosuficiente, que apareció a partir de la escena del cultivo de setas psicodélicas iniciado en la década de 1970 de la mano de Terence McKenna y Paul Stamets. El movimiento adquirió su forma actual cuando creció colaborando con *hackerspaces*, proyectos científicos de colaboración abierta y foros en línea.

Aunque su epicentro siga estando en la costa oeste de Norteamérica, las organizaciones micológicas de base se están expandiendo a otros países y continentes. La palabra «radical» deriva del latín *radix*, que significa raíz. Las preocupaciones de la micología radical recaen, en sentido literal, en su base de micelio.[12]

Es para estos entusiastas de base que McCoy fundó una escuela de micología en línea, Mycologos, porque los conocimientos sobre hongos a menudo son inaccesibles y difíciles de entender. Su misión es remodelar las relaciones entre seres humanos y hongos distribuyendo esta información para que se entienda mejor: «Me imagino a equipos de Radical Mycologists Without Borders viajando por el mundo, compartiendo sus conocimientos y descubriendo nuevas formas de trabajar con hongos. Allí donde un micólogo radical enseña a 10, esos 10 pueden enseñar a 100, y esos a un millar; y así es como se expande el micelio.»[13]

En otoño del 2018, viajé hasta una granja de Oregón para la bianual Radical Mycology Convergence. Allí me encontré con más de 500 lumbreras de los hongos, cultivadores de setas, artistas, entusiastas en ciernes y activistas sociales y ecológicos que revoloteaban por un patio. Vestido con una gorra de beisbol, unas deportivas gastadas y gafas de miope, McCoy presentó la jornada con un discurso inaugural: «Micología de liberación».

Para cultivar setas, independientemente del volumen de producción, los cultivadores tienen que desarrollar un fino olfato por el material que satisface los voraces apetitos de los hongos. La mayoría de hongos que producen setas prosperan en los estropicios creados por los seres humanos. Crear cultivos industriales sobre desechos viene a ser como una especie de alquimia. Los hongos convierten un lastre de signo negativo en un producto con un valor con el que ganan todos: el productor de residuos, el cultivador y los hongos. La ineficiencia de muchas industrias es una bendición para los productores de setas. La agricultura, en particular, genera muchos residuos: las plantaciones de aceite de oliva y de coco desechan el 95% de la biomasa total producida. Las plantaciones de caña de azúcar desechan el 83%. La vida en las ciudades no es mucho mejor. En Ciudad de México, los pañales usados constituyen entre el 5% y el 15% del peso total de los residuos sólidos. Los investigadores han descubierto que el omnívoro micelio de *Pleurotus* –un hongo de la podredumbre

blanca cuyos frutos son las setas ostra, comestibles– puede crecer alegremente a base de una dieta de pañales usados. En el curso de dos meses, los pañales (previo retiro del envoltorio de plástico) a los que se había introducido *Pleurotus* perdieron el 85% de su masa inicial, y aquellos a los que no se introdujo el hongo solo perdieron el 5%. Es más, las setas que salieron eran saludables y sin ninguna enfermedad humana. En la India se están realizando proyectos similares. Al cultivar *Pleurotus* sobre residuos agrícolas –que se queman enzimáticamente–, se combustiona menos biomasa termalmente y la calidad del aire mejora.[14]

No sorprende, pues, que los estropicios que han producido los humanos puedan parecer una oportunidad desde la perspectiva de los hongos. Los hongos han sobrevivido a cinco extinciones masivas en la Tierra, cada una de las cuales eliminó entre el 75% y el 95% de las especies del planeta. Algunos hongos incluso prosperaron durante estos catastróficos episodios. Tras la extinción del Cretácico-Terciario, a la que se atribuye la desaparición de los dinosaurios y la destrucción masiva de los bosques en todo el globo, los hongos prosperaron alimentados por abundante material leñoso muerto listo para descomponer. Los hongos radiotróficos –aquellos capaces de cultivar la energía emitida por partículas radioactivas– crecen en las ruinas de Chernóbil y son solo las últimas piezas clave en una historia más larga de relación nuclear entre hongos y seres humanos. Tras la explosión de la bomba atómica en Hiroshima, se informó que el primer ser vivo que surgió de la devastación fue una seta *matsutake*.[15]



**Setas ostra, *Pleurotis ostreatus*, que crecen sobre residuos agrícolas**.

Los hongos tienen apetitos diversos, pero no descomponen según qué materiales a menos que tengan que hacerlo. En uno de sus talleres, McCoy explicó cómo había adiestrado al micelio del *Pleurotus* para digerir uno de los componentes más presentes en la basura del todo el mundo: las colillas de cigarrillo –cada año se tiran más de 750 000 toneladas–. Las colillas de cigarrillo sin usar, con el paso del tiempo, se descompondrán, pero las colillas usadas están empapadas con residuos tóxicos que impiden el proceso. McCoy había sometido a los *Pleurotus* a una dieta de colillas usadas eliminando poco a poco las otras alternativas. Con el tiempo, el hongo había 'aprendido' a utilizarlas como su única fuente de alimento. Un vídeo a cámara rápida mostraba cómo el micelio iba subiendo por un tarro lleno de colillas manchadas de alquitrán. Y de repente creció una corpulenta seta ostra que acabó saliendo por arriba.[16]

De hecho, hay tanto de 'recuerdo' como de 'aprendizaje'. Un hongo no produce enzimas que no necesita. Las enzimas, o incluso caminos metabólicos enteros, pueden permanecer en estado durmiente durante generaciones en los genomas de los hongos. Para que el micelio del *Pleurotus* pueda digerir las colillas usadas tal vez tenga que desempolvar algún paso metabólico que no usa. O quizá deba utilizar una enzima que suele usar para otra cosa y ponerla al servicio de una nueva causa. Muchas enzimas de hongo, como las ligninas peroxidasa, no son específicas. O sea que una sola enzima puede servir como herramienta múltiple, permitiendo así al hongo metabolizar diferentes compuestos con estructuras similares. Conforme sucede, muchos contaminantes tóxicos –incluidos los de las colillas de cigarrillo– parecen los derivados de la descomposición de la lignina. En este sentido, confrontar el micelio del *Pleurotus* con colillas usadas de cigarrillo es ofrecerle un desafío normal.[17]

Buena parte de la micología radical está asegurada por la química radical de los hongos de la podredumbre blanca. Sin embargo, no siempre es fácil predecir qué metabolizará una cepa de un hongo determinado. McCold nos explicó cómo intentó cultivar micelio del *Pleurotus* en placas rociadas con gotitas de glifosato herbicida. Algunas de las cepas de *Pleurotus* evitaron las gotas; otras crecieron en ellas; y las hubo que se hicieron mayores hasta llegar al borde de una gota donde dejaron de crecer. «Esas tardaron una semana en averiguar cómo descomponerlo», recordaba McCoy. Comparó a los hongos con carceleros con juegos de llaves enzimáticas que pueden abrir ciertas cadenas químicas. Algunas cepas quizá tenían la llave correcta a punto; otras tal vez la tenían enterrada en

algún lugar de sus genomas pero decidieron prescindir de la nueva sustancia; y algunas quizá se pasaron una semana inspeccionando el juego de llaves y probando diferentes hasta dar con la correcta.

McCoy, como tantos otros miembros del movimiento de micología autosuficiente, recibió el primer impacto del fervor por los hongos de la mano de Stamets. Desde su influyente trabajo sobre setas psilocibinas en la década de 1970, Stamets se había convertido en un híbrido insólito de evangelista y magnate de los hongos. Su TED Talk «Six Ways That Mushrooms Can Save The World» (Seis soluciones de las setas que pueden salvar el mundo) ha tenido millones de visionados, y dirige una exitosa empresa multimillonaria de hongos, Fungi Perfecti, que vende desde espráis antivirales para la garganta a chuches de hongos para perros («Muttrooms»). Además, sus libros sobre la identificación y el cultivo de setas –incluido el decisivo *Psilocybin Mushrooms of the World*– siguen siendo un referente esencial para innumerables micólogos, entusiastas de base y demás.

Siendo adolescente, Stamets sufría de un tartamudeo agotador. Un día, se tomó una generosa dosis de setas mágicas y trepó hasta la copa de un árbol alto, donde quedó atrapado por una tormenta eléctrica. Cuando bajó, el tartamudeo había desaparecido. Stamets se había convertido. Estudió micología en el Evergreen State College y desde entonces ha dedicado toda su vida a los hongos. Stamets no es miembro de Radical Mycology pero, igual que McCoy, se dedica a difundir el mensaje de los hongos a un público lo más amplio posible. En su página web hay una carta de un cultivador sirio que, inspirado por Stamets, desarrolló formas de cultivar setas ostra en detritos agrícolas. El cultivador enseñó a más de un millar de personas a cultivarlas en sus sótanos, proporcionándoles un alimento durante los seis años de asedio y bombardeo de las tropas del régimen de Assad.

De hecho, no exageraría si dijera que Stamets ha hecho más que nadie por popularizar los temas de los hongos fuera de los departamentos de biología de las universidades. No obstante, su relación con el mundo académico no es fácil. Desde sus declaraciones sensacionales a sus teorías especulativas, Stamets no se comporta, en muchos sentidos, como lo haría un científico académico. Y aun así, su planteamiento inconformista es innegablemente efectivo. Hay una tirantez que, a veces, roza lo absurdo. En su día Stamets explicó una queja que había

recibido de un profesor universitario que conoce: «Paul, tú has creado un problema tremendo. Queremos estudiar hongos y estos estudiantes quieren salvar el mundo. ¿Qué hacemos?»[18].

*

Una de las formas en las que los hongos podrían ayudar a salvar el mundo sería contribuyendo a la restauración de ecosistemas contaminados. En «micorremediación», tal y como se conoce al campo, los hongos colaboran en las operaciones de limpieza medioambiental.

Llevamos miles de años reclutando hongos para que descompongan cosas. Las diversas poblaciones de microbios en nuestros intestinos nos recuerdan que, en esos momentos de nuestra historia evolutiva que no fuimos capaces de digerir algo solos, integramos a los microbios. Y allí donde esto ha demostrado ser imposible, hemos subcontratado el proceso al exterior utilizando barriles, tarros, pilas de compost y fermentadoras industriales. La vida humana depende de muchas formas de digestión externa para la que se emplean hongos: desde el alcohol a la salsa de soja, las vacunas, la penicilina o el ácido cítrico usado en todas las bebidas con gas. Este tipo de asociación –en la que diferentes organismos cantan juntos una ‘canción’ que ninguno podría cantar por separado– representa una de las máximas más antiguas de la evolución. La micorremediación es solo un caso especial.

Y muestra un gran potencial. Los hongos tienen un apetito voraz por toda suerte de contaminantes además de las colillas de cigarrillo y el herbicida glifosato. En su libro *Mycelium Running*, Stamets escribe sobre una colaboración con un instituto de investigación del estado de Washington, que se asoció con el Departamento de Defensa de Estados Unidos para desarrollar formas para descomponer una potente neurotoxina. La sustancia química –el metilfosfonato de dimetilo, o DMMP– era uno de los componentes letales del gas VX, fabricado y utilizado a finales de la década de 1980 por Saddam Hussein durante la guerra Irán-Irak. Stamets envió a sus colegas 28 especies diferentes de hongos, que estuvieron expuestas al compuesto en concentraciones gradualmente ascendente. A los seis meses, dos de las especies habían ‘aprendido’ a consumir DMMP como su principal fuente de nutrientes. Una era *Trametes*, o cola de pavo, y la otra, *Psilocybe azurescens*, la especie conocida

que produce la psilocibina más potente, descubierta por Stamets unos años antes y llamada así por la tonalidad azulada de sus tallos (de hecho, su hijo Azureus debe su nombre a la seta). Las dos son hongos de la podredumbre blanca.[19]

En los libros de micología hay cientos de ejemplos similares. Los hongos pueden transformar muchos contaminantes comunes en el suelo y en vías de agua que ponen las vidas en peligro, ya sean humanas o demás. Son capaces de degradar pesticidas (como clorofenoles), tintes sintéticos, explosivos TNT y RDX, petróleo, algunos plásticos y varios fármacos para el consumo humano y animal que no se eliminan en las plantas de tratamiento de aguas residuales, desde antibióticos a hormonas sintéticas.[20]

En principio, los hongos son unos de los organismos mejor cualificados para la remediación (descontaminación) ambiental. El micelio ha sido ajustado a lo largo de 1000 millones de años de evolución para un objetivo primordial: ingerir. Es apetito en forma corpórea. Durante cientos de millones de años antes del *boom* de las plantas en el Carbonífero, los hongos sobrevivieron porque encontraron maneras de descomponer el detrito que otros organismos dejaban. Pueden incluso acelerar la descomposición proporcionando 'carreteras' miceliares que permiten a las bacterias viajar a lugares de putrefacción que, por otro lado, serían inaccesibles. Y aun así, la descomposición es solo una parte de la historia. Los metales pesados se acumulan en los tejidos de los hongos, que después se pueden eliminar y deshacer de forma segura. La densa malla del micelio se puede incluso utilizar para filtrar agua contaminada. La «micofiltración» elimina enfermedades infecciosas como el *E. coli* y absorbe metales pesados como una esponja –una empresa de Finlandia utiliza esta técnica para recuperar oro de los desechos electrónicos.[21]

No obstante, pese a su potencial, la micorremediación no es una solución tan sencilla. Solo porque una cepa de hongos concreta se comporte de una determinada manera en una placa no significa que vaya a hacer lo mismo cuando se introduzca en el jolgorio de un ecosistema contaminado. Los hongos tienen necesidades –como oxígeno o fuentes de alimento adicionales– que deben tenerse en cuenta. Además, la descomposición se produce por etapas, realizada por una sucesión de hongos y bacterias, cada uno capaz de retomarla allí donde la han dejado los otros. Es ingenuo imaginar que una cepa de hongo educada en un laboratorio podrá actuar eficazmente en un nuevo entorno y remediar una situación por sí misma. Los desafíos a los que se enfrentan los micorremediadores son análogos a los que se enfrentan los vinicultores –sin unas

condiciones apropiadas, la levadura tendrá dificultades para convertir el azúcar de un barril de zumo de uva en alcohol– a menos que el barril de vino sea un ecosistema contaminado y nosotros estemos en él.[22]

McCoy propuso un planteamiento radical basado en hechos empíricos practicados por aficionados de base. Yo me mostré escéptico. El campo de la micorremediación me llegó al alma pero necesita un gran estímulo institucional. Las originales soluciones caseras están muy bien, pero seguramente se necesitan estudios a gran escala. ¿Cómo podría este campo progresar sin proyectos emblemáticos, grandes becas y atención de las instituciones? Me costaba imaginar cómo un ejército de aficionados de base, independientemente de su compromiso, podía contar con el equipo o ser lo bastante creíbles para seguir adelante.

Enseguida me di cuenta de que McCoy proponía este planteamiento no por desacato a la investigación institucional sino porque esta escaseaba. Muchos factores contribuyen a ello. Los ecosistemas son complejos, y no hay una única solución fúngica que funcione en todos los sitios y condiciones. Para desarrollar protocolos estándar de micorremediación expansibles se requeriría una gran inversión, que no es habitual en el sector de la descontaminación: en su conjunto, la descontaminación la asumen empresas reacias pero que están obligadas por ley y muy pocas están interesadas en soluciones consideradas experimentales o alternativas. Por otra parte, hay una industria convencional de descontaminación en pleno auge, que levanta el suelo contaminado por toneladas, lo transporta a otro lugar y lo quema. Pese a los gastos y a la alteración ecológica que esto supone, es una industria que no tiene prisa en ser reemplazada.

Los micólogos radicales no pueden hacer gran cosa salvo tomar ellos mismos las riendas. Y desde principios de la década del 2000, inspirados en parte por el evangelismo de Stamets, se han llevado a cabo bastantes proyectos para probar soluciones fúngicas. Una de las organizaciones decanas, CoRenewal, ha estado investigando la capacidad de los hongos para eliminar la toxicidad de los derivados venenosos de la extracción de crudo dejados por las operaciones de Chevron durante 26 años en la Amazonia ecuatoriana. En una coalición con socios en las zonas contaminadas, los científicos están analizando las comunidades microbianas y las cepas de hongos «petrofílicos» de la zona hallados en suelos contaminados. Es la típica micología radical –micólogos locales aprendiendo cómo asociarse a cepas de hongos locales para solucionar

problemas locales–. Pero hay otros ejemplos. Una organización de base en California ha extendido kilómetros de tubos llenos de paja y micelio de *Pleurotus* para remediar los residuos tóxicos dejados por las casas quemadas en los incendios descontrolados del 2017. En el 2018, se instalaron barreras flotantes de contención llenas de micelio de *Pleurotus* en un puerto danés para ayudar a limpiar los vertidos de petróleo. La mayoría de estos proyectos justo acaban de empezar, otros están sobre la mesa. Ninguno ha alcanzado la madurez.[23]

¿Acabará despegando la micorremediación? Aún es demasiado pronto para decirlo. Pero está claro que ahora, mientras nos preocupamos en los lindes de un charco tóxico creado por nosotros, los micólogos radicales, basados en la capacidad de ciertos hongos para descomponer madera, ofrecen un atisbo de esperanza. Nuestro método escogido para acceder a la energía de la madera ha sido quemarla. Esto también es una solución radical. Y es esta energía –los vestigios fosilizados de un *boom* forestal en el Carbonífero– la que nos ha ayudado a meternos en líos. ¿Podría ahora rescatarnos la química radical de los hongos de la podredumbre blanca –una reacción evolutiva a ese mismo *boom* forestal?

Para Peter McCoy, Radical Mycology no es solo resolver problemas concretos en lugares concretos. Una red repartida de practicantes de base también puede lograr que el conjunto del estado de conocimiento de los hongos avance. Una forma en la que esto puede ocurrir es a través del descubrimiento y aislamiento de cepas de hongos potentes. Los hongos descubiertos en un entorno contaminado quizá ya han aprendido a digerir un contaminante determinado y, como los lugareños, ser capaces de remediar un problema *y* prosperar. Este fue precisamente el planteamiento utilizado por unos investigadores en Pakistán, quienes, en el 2017, estudiaron el suelo de un vertedero urbano en Islamabad y hallaron una cepa novedosa de hongo que podía degradar el plástico de poliuretano.[24]

Pedir la colaboración de la gente en las cepas de hongos puede sonar descabellado, pero ha permitido hacer grandes descubrimientos. La producción industrial de la penicilina antibiótica fue solo posible gracias al hallazgo de una cepa muy provechosa de hongo *Penicillium. En* 1941, este «moho bastante dorado» fue descubierto en un melón que se estaba pudriendo en un mercado de

Illinois por Mary Hunt, una ayudante de laboratorio, después de que el laboratorio hiciera un llamamiento a los civiles para que trajeran mohos a sus instalaciones. Hasta ese momento, la penicilina había sido cara de producir y no estaba, ni mucho menos, al alcance de todos.[25]

Encontrar cepas de hongos es una cosa, pero aislarlos y evaluar su actividad ya es otra historia. Puede que Hunt encontrara el moho, pero tuvo que llevarlo a un laboratorio para que fuera analizado. Y ahí residía mi principal duda sobre el planteamiento de McCoy. ¿Cómo podían los micólogos radicales aislar y cultivar nuevas cepas sin acceder a instalaciones en condiciones? Bancos estériles que bombean aire limpio, productos químicos ultra puros, máquinas caras que ronronean en salas equipadas, ¿seguro que es todo lo que necesitamos para poder progresar?

Como quería saber más, asistí a uno de los cursos para cultivar setas que impartía McCoy un fin de semana en Brooklyn, Nueva York. En la clase había de todo: artistas, educadores, planificadores comunitarios, programadores informáticos, un profesor universitario, emprendedores y chefs. McCoy estaba detrás de una mesa hasta arriba de placas apiladas, bolsas de plástico llenas de cereales y cajas con jeringas y escalpelos –el kit básico del moderno cultivador de setas–. Un gran perol de agua con gelatinosas setas oreja de Judas hervía sobre el fogón, que nos servimos en tazas cuando hicimos una pausa. Esto era micología radical en su ápice de crecimiento. O mejor aún, en uno de sus ápices de crecimiento.

Durante todo el fin de semana, quedó claro que el campo *amateur* del cultivo de hongos está desatado. Una red bien conectada de entusiastas de los hongos en constante experimentación ya está acelerando la producción de conocimientos sobre hongos. Técnicas como la secuenciación de ADN siguen fuera del alcance de la mayoría, pero los avances recientes les permiten realizar operaciones imposibles hace solo 10 años. Casi todas son soluciones poco sofisticadas pero ingeniosas, creadas por cultivadores de setas mágicas en sus casas. Muchas son mejoras y modificaciones de métodos desarrollados y publicados por Terence McKenna y Paul Stamets en sus guías del cultivador. Aunque la visión de la transformación micológica de McCoy incluye espacios en laboratorios comunitarios, sin ellos también se puede hacer mucho.

La innovación más revolucionaria apareció en el 2009. El fundador del foro de cultivo de setas mágicas mycotopia.net, conocido solo por el alias de hippie3, concibió un método para cultivar setas sin temor a la contaminación. Esto lo

cambió todo. La contaminación es la amenaza para cualquier cultivador de hongos. El material recién esterilizado es un vacío biológico; si se expone al convulso mundo del aire libre, la vida irrumpe en él. Al utilizar el método «puerto de inyección» de hippie3, el cultivador *amateur* puede dejar de lado los kits caros y los procedimientos complicados. Solo se necesitan una jeringa y un tarro de mermelada modificado. La información corrió como la pólvora. Según McCoy, este fue uno de los avances más importantes en la historia de la micología –«resultados de laboratorio sin el laboratorio»–, que cambió el cultivo de setas para siempre. Sonrió y expulsó un líquido con la jeringa que sostenía. «Un chorrito por hippie3.»

Me reí pensando en los equipos de *micohackers* probando mil y una estrategias para solucionar problemas, igual que el micelio del *Pleurotus* de McCoy había orillado el charco de glifosato, probando con diferentes enzimas hasta dar con la correcta. McCoy enseñaba a micólogos radicales a cultivar hongos en casa para que después pudieran educar a las cepas de hongos a sacar provecho de otra negligencia tóxica más de los humanos. Incluso con incentivos relativamente pequeños, el campo podía avanzar rápidamente. Tuve la imagen de multitud de entusiastas reuniéndose para ver quién iba más rápido en crear diabólicos cócteles de residuos tóxicos con cepas de hongos caseros para ganar un premio anual de un millón de dólares.[26]

¡Queda tanto por ver! La micología, ya sea radical o no, está en fase embrionaria. Los seres humanos llevan más de 12000 años cultivando y domesticando plantas. Pero, ¿qué pasa con los hongos? Los primeros registros sobre cultivo de setas tienen 2000 años, en China. Wu San Kwung, a quien se reconoce como el primer cultivador de setas *shiitake* –otro hongo de la podredumbre blanca– en China hacia el año 1000, se le recuerda con una fiesta anual, y hay templos en todo el país dedicados a sus logros. A finales del siglo XIX, en las catacumbas de caliza del subsuelo de París, cientos de cultivadores de setas producían más de 1000 toneladas de «setas de París» al año. Pero las técnicas llevadas a cabo en laboratorios solo aparecieron hace un siglo. Y muchas de las técnicas que enseña McCoy, también el método del puerto de inyección de hippie3, solo tienen 10 años.[27]

El curso de McCoy concluyó en una explosión de entusiasmo, ideas y revoloteo. «Hay muchas formas para jugar –soltó con una sonrisa medio provocativa y medio alentadora–. Hay mucho que ni siquiera sabemos.»

Desde que existen, los hongos han estado provocando un «cambio desde las raíces». Los humanos son los últimos en incorporarse a esta historia. Hace cientos de millones de años que muchos organismos forman asociaciones radicales con hongos. Muchas de ellas –como las relaciones de las plantas con hongos micorrícicos– han constituido momentos estelares en la historia de la vida que han cambiado el mundo. Hoy hay infinidad de seres no humanos que cultivan hongos en formas sofisticadas, con resultados radicales. ¿Se puede pensar en estas relaciones como en ancestrales precursoras de la micología radical?[28]

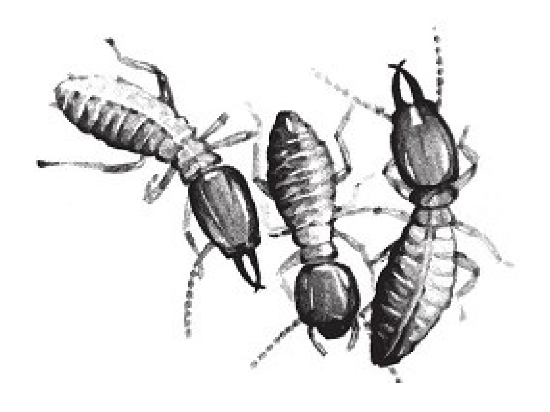
Las termitas africanas *Macrotermes* son uno de los ejemplos más sorprendentes. Las *Macrotermes*, como la mayoría de termitas, pasan buena parte de sus vidas buscando madera para comer, aunque no puedan comerla. Para poder hacerlo, cultivan un hongo de podredumbre blanca –*Termitomyces*– que la digiere por ellas. Las termitas mastican la madera hasta convertirla en una pasta líquida que regurgitan en huertos fúngicos, conocidos como «panales de hongos», para contrastar con el panal de las abejas. El hongo utiliza química radical para descomponer la madera y las termitas consumen el compost que queda. Para albergar al hongo, las *Macrotermes* construyen excelsos montículos de hasta 9 m de altura, algunos de los cuales tienen más de 2000 años. Las sociedades de *Macrotermes*, igual que las de las hormigas cortadoras de hojas, son algunas de las más complejas formadas por insectos.[29]

Los termiteros de las *Macrotermes* son tripas gigantescas y al exterior –metabolismos protésicos que permiten a las termitas descomponer materiales complejos que ellas solas no pueden degradar–. Como pasa con los hongos que cultivan, las *Macrotermes* alteran el concepto de individualidad. Un individuo de termita no puede sobrevivir sin su sociedad. Una sociedad de termitas no puede sobrevivir separada de los cultivos de hongos y otros microbios que la alimentan, y de la que ellos se alimentan. La asociación es productiva: una proporción considerable de madera descompuesta en los trópicos africanos pasa por los termiteros de *Macrotermes*.[30]

Mientras los seres humanos acceden a la energía íntimamente adherida a la lignina quemándola físicamente, las *Macrotermes* ayudan a un hongo de la podredumbre blanca a quemarla químicamente. Las termitas utilizan a dichos hongos de la misma manera que un micólogo radical recluta a un *Pleurotus* para degradar crudo o colillas de cigarrillo. O de la misma manera que un micólogo no menos radical subcontrata a hongos para que metabolicen en barriles y tarros

usados para fermentar vino, *miso* o queso. Sin embargo, no hay duda de quién llegó primero. Las *Macrotermes* ya llevaban 20 millones de años cultivando hongos para cuando evolucionó el género *Homo*. Y claro, cuando se trata de hongos *Ter mitomyces*, las técnicas de cultivo de las termitas superan con creces a las de los humanos. Las setas *Termitomyces* son una exquisitez (una de las setas más grandes del mundo, de hasta 1 m de anchura) pero los seres humanos no han logrado cultivarlas, pese a haberlo intentado durante mucho tiempo. El hongo necesita de las condiciones en delicado equilibrio que les suministran las termitas mediante una combinación de sus simbiontes bacterianos y la arquitectura de sus termiteros.

La pericia de las termitas no ha pasado inadvertida a los seres humanos que viven cerca. La química radical de los hongos de la podredumbre blanca –y su extraordinaria fuerza– ha estado entrelazada a las vidas de los seres humanos desde hace mucho tiempo. Se ha informado que las termitas ingieren propiedades en Estados Unidos cada año por un valor de entre 1500 y 2000 millones de US$. (Tal y como Lisa Margonelli observa en *Underbug*, a las termitas norteamericanas se las describe normalmente como comedoras de propiedades «privadas», como si fueran anarquistas o anticapitalistas deliberadas.) En el 2011, las termitas se colaron en un banco de la India y se comieron 10 millones de rupias en billetes –225000 US$–. Y para dar una vuelta de tuerca al tema de las asociaciones radicales de los hongos, una de las «seis soluciones de las setas que pueden salvar el mundo» de Paul Stamets implica modificar la biología de ciertos hongos causantes de enfermedades para que puedan repeler las defensas de las termitas y exterminen sus colonias (el moho *Metarhizium*, el mismo hongo que puede eliminar poblaciones de mosquitos portadores de la malaria).[31]



**Termitas *Macrotermes*.**

El antropólogo James Fairhead describe cómo los granjeros en muchas zonas del oeste de África alientan a las termitas *Macrotermes* por la forma en la que ‘despiertan’ el suelo. A veces los seres humanos comen tierra del interior de los termiteros o se embadurnan las heridas con ella, y está probado que ello tiene bastantes beneficios: como complemento mineral, o antídoto a toxinas, o en forma de antibiótico –las *Macrotermes* cultivan una bacteria que produce antibiótico, el *Streptomyces*, en sus termiteros–. Los humanos incluso han empleado la asociación entre las *Macrotermes* y sus hongos como arma para causas políticas radicales. A principios del siglo XX, en la costa occidental de África, los lugareños liberaron termitas a escondidas en las instalaciones de un destacamento francés colonizador. Impulsadas por los voraces apetitos de sus hongos asociados, las termitas destruyeron las instalaciones y se comieron la documentación de los burócratas. La guarnición francesa no tardó en abandonar su puesto.[32]

En las jerarquías espirituales de algunas culturas del oeste de África, las termitas ocupan un lugar por encima de los seres humanos. En unas, se trata a las *Macrotermes* como a mensajeros entre los seres humanos y los dioses. En otras, se considera que Dios creó el universo únicamente gracias a la ayuda de una termita. En estos mitos, se retrata a las *Macrotermes* no solo como descomponedoras sino como grandes constructoras.[33]

En todo el mundo ya está empezando a calar la idea de que los hongos pueden ser utilizados no solo para descomponer cosas sino también para construir. Un material hecho con las capas exteriores de los champiñones promete ser un buen sustituto al grafito en las pilas de litio. El micelio de algunas especies constituye un sucedáneo de piel efectivo que utilizan algunos cirujanos para curar heridas. Y en Estados Unidos, una empresa llamada Ecovative cultiva materiales de construcción con micelio.[34]

Fui a visitar las instalaciones de Ecovative en un polígono industrial al norte del estado de Nueva York. Al entrar en el vestíbulo, había productos de micelio por todas partes: tablas, ladrillos, paneles acústicos y envases moldeados para botellas de vino. Todos tenían un color gris pálido y una textura tosca que recordaba al cartón. Al lado de una lámpara y de un taburete había una caja llena de cubos blancos y blandos de micelio. Y a su lado, una pieza de cuero de

hongos. Me sentía como si hubiera irrumpido en el plató de un programa de televisión donde se ríen de la gente a partir de grandes afirmaciones sobre cómo los hongos pueden salvar el mundo.

Eben Bayer, el joven director ejecutivo de Ecovative, me sorprendió apretujando una pieza de micelio. «Dell envía sus servidores en embalajes como ese. Les mandamos medio millón de piezas al año.» Me señaló un taburete. «Muebles cultivados de forma segura, saludable y sostenible.» Su silla estaba cubierta con cuero de micelio y acolchada con espuma de micelio. De pedirnos una, la recibirías embalada en micelio. Mientras la micorremediación consiste en descomponer las consecuencias de nuestros actos, la «micofabricación» consiste en recomponer los tipos de material que elegimos utilizar. Es el *yang* al *yin* de la descomposición.

Como los micólogos radicales que había conocido en Oregón y Brooklyn, Ecovative desvía los flujos de vertidos agrícolas para alimentar a sus hongos. Del serrín o de los tallos de maíz creció un producto valioso. Se trata del ya familiar concepto de que todos ganan con los hongos: el productor de residuos, el cultivador y el hongo. Pero, en el caso de Ecovative, había otros que también ganaban. Eben Bayer siempre ha soñado en trastocar las industrias contaminantes. Los materiales de empaquetado que Ecovative cultiva están diseñados para sustituir los plásticos; y sus materiales de construcción, para reemplazar el ladrillo, el hormigón y el aglomerado. Además, sus tejidos que imitan el cuero reemplazan la piel de los animales; se pueden cultivar cientos de metros cuadrados de cuero de micelio en menos de una semana encima de materiales que, de otra manera, serían desechados. Y los productos de micelio, al final de su vida útil, pueden ser compostados. Los materiales de Ecovative son ligeros, resistentes al agua e ignífugos. Son más fuertes que el hormigón cuando están sujetos a fuerzas de flexión y resisten mejor la compresión que las estructuras de madera. Tienen mejor aislamiento térmico que el poliestireno expandido, y se pueden cultivar en formas de lo más diversas en cuestión de días (en Australia hay investigadores trabajando para crear un ladrillo resistente a las termitas al combinar micelio de *Trametes* con vidrio molido –un producto que evitaría el empleo de hongos que matan termitas, tal como proponía Paul Stamets).[35]

El potencial de los materiales de micelio no ha pasado inadvertido. La diseñadora Stella McCartney trabaja en un cuero de hongos que cultiva utilizando métodos de Ecovative. Y esta empresa tiene una estrecha relación con

IKEA, que trabaja para sustituir su embalaje de poliestireno con una alternativa de micelio. Los investigadores de la NASA se han interesado en la «micotectura» y su papel potencial en estructuras que crezcan en la Luna. Ecovative acaba de firmar un contrato de 10 millones de US$ con la Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA), una sección del Ejército estadounidense dedicada a la investigación y el desarrollo. DARPA está interesada en los barracones en crecimiento de micelio que se autorreparan cuando sufren daños y se descomponen cuando ya han cumplido su función. La idea inicial de Bayer no eran barracones que crecen, pero su técnica es muy versátil. «Podemos utilizar estos métodos para crear refugios de socorro que crecen en zonas catastróficas –me señaló Bayer–. Con micelio se puede hacer crecer muchos alojamientos para mucha gente a un coste realmente bajo.»[36]

La idea básica es sencilla. El micelio se entreteje formando una tupida tela. Acto seguido, se seca el micelio vivo para convertirlo en material muerto. El producto final depende de cómo se ha estimulado el crecimiento del micelio. Los ladrillos y el material de embalaje se forman a medida que el micelio 'examina' raudo una pasta de serrín húmeda comprimida en moldes. Los materiales flexibles están hechos de micelio puro. Tuéstalo y conseguirás cuero. Sécalo y conseguirás una espuma que se puede utilizar para hacer desde plantillas para calzado deportivo a diques flotantes. Mientras McCoy y Stamets empujan a los hongos a adoptar nuevos comportamientos metabólicos, Bayer los incita a adoptar nuevas formas de crecimiento. El micelio siempre se va a volcar en su entorno, sea este un charco de neurotoxinas o un molde en forma de lámpara.[37]

Bayer y yo atravesamos varias puertas hasta desembocar en un hangar lo bastante grande como para construir un avión en él. Las virutas de madera y otras materias primas se deslizaban por conductos hasta tambores de mezcla donde las proporciones se controlaban digitalmente a través de paneles de pantallas de ordenador. Los tornillos de Arquímedes de 6 m de longitud transportaban flujos de serrín por cámaras de calentamiento y de enfriamiento a un ritmo de media tonelada cada hora. Se movían moldes de plástico apilados entre cámaras de cultivo y estantes de secado de 10 m de altura. Las cámaras eran microclimas controlados digitalmente –los niveles de luz, humedad, temperatura, oxígeno y dióxido de carbono variaban en ciclos cuidadosamente programados–. Era como el termitero de *Macrotermes* en versión industrial humana.

Igual que la nave de cultivo de Ecovative, los termiteros de *Macrotermes*

son microclimas regulados escrupulosamente, construidos en torno a las exigencias del hongo. Al abrir y cerrar túneles dentro del sistema de chimeneas y galerías, las termitas son capaces de regular la temperatura, la humedad y los niveles de oxígeno y dióxido de carbono. En pleno Sáhara, las termitas pueden crear las condiciones de frescor y humedad que el hongo necesita para prosperar.

Como en los termiteros de *Macrotermes*, los hongos que crecen en Ecovative son de la especie de hongos de la podredumbre blanca. Casi todos los productos crecen a partir del micelio del *Ganoderma*, cuyo cuerpo fructífero es la seta *reishi*. Algunos usan el *Pleurotus*, y otros el *Trametes*, cuyo fruto es la seta cola de pavo. El *Pleurotus* fue el que McCoy educó para que digiriera glifosato y colillas de cigarrillo. Y el *Trametes* fue el que Stamets y sus colaboradores educaron para digerir el precursor tóxico al gas VX. De la misma manera que diferentes cepas de hongos varían su disposición para descomponer agentes nerviosos tóxicos o glifosato, diferentes cepas varían su velocidad de crecimiento y el tipo de material que su micelio hará.[38]

Ecovative tiene la patente de su procedimiento y cultiva más de 400 toneladas de muebles y embalajes cada año, pero su modelo de negocio no depende de ser el principal productor de materiales de micelio. Hay personas y organizaciones con autorización para utilizar los kits Grow It Yourself (GIY) de Ecovative en 31 países, que permiten hacer desde muebles a tablas de surf, y son muy populares los artículos de iluminación (se ha presentado recientemente la lámpara MushLume). Además, un diseñador de los Países Bajos está elaborando zapatillas de micelio, y la US National Oceanic and Atmospheric Administration sustituyó la espuma plástica de los flotadores de los sensores detectores de tsunamis por una alternativa de micelio.[39]

Una de las intenciones más ambiciosas para construir con micelio es Fungal Architectures, o FUNGAR, un consorcio internacional de científicos y diseñadores que pretende construir un edificio entero íntegramente de hongo, combinando conglomerados de micelio con ‘circuitos informáticos’ de hongos que detectarán y reaccionarán a los niveles de luz, temperatura y contaminación. Uno de los investigadores principales es Andrew Adamatzky, del Unconventional Computing Lab, un científico que propone que las redes de micelio pueden ser aprovechadas para computar información utilizando impulsos eléctricos que pasen por sus hifas. Las redes de micelio solo generan impulsos eléctricos cuando están vivas, un problema que Adamatzky espera solventar estimulando al micelio vivo para que absorba partículas conductoras de

electricidad. Una vez muertas y preservadas, estas redes de micelio crearán circuitos eléctricos consistentes en cables de micelio, transistores y condensadores, «una red informática que llenará cada milímetro cúbico del edificio».[40]

Al pasear por la nave de producción de Ecovative, es inevitable pensar que algunas especies de hongos de la podredumbre blanca se lo montan muy bien con este acuerdo. Vale, se las mata antes de utilizar los materiales. Pero solo después de haber satisfecho sus apetitos. Y solo después de haber sido introducidas, una vez más, en cientos de kilos de serrín recién pasteurizado. Al igual que McCoy y los micólogos radicales que, en sentido literal y figurado, dispersan esporas por todo el mundo, Ecovative es como un sistema de dispersión de especies de hongo a nivel global. Los hongos son, al mismo tiempo, una 'tecnología' y socios de los seres humanos en un nuevo tipo de relación.

Es demasiado pronto para decir adónde nos llevarán las relaciones forjadas en Ecovative. Para solucionar el problema de cómo acceder a la energía de la materia vegetal, las termitas *Macrotermes* han estado cultivando enormes cantidades de hongos de la podredumbre blanca en instalaciones de producción construidas para tal fin durante 30 millones de años. Las *Macrotermes* y los *Ter mitomyces* llevan tanto tiempo viviendo juntos que ninguno de los dos puede sobrevivir sin el otro. Aún no se puede saber si la micofabricación llevará a los seres humanos a una simbiosis de dependencia mutua, pero lo que sí ya está claro es que, una vez más, una crisis global se está convirtiendo en una variedad de oportunidades para los hongos. Y una vez más, las corrientes de residuos humanos están siendo reinterpretadas desde el punto de vista de los apetitos de los hongos. Algunas tendencias se hacen virales. Y empecé a considerar lo que significaría hacerse fúngico.

Si alguien sabe sobre hacerse fúngico, ese es Paul Stamets; a menudo me pregunto si ha sido infectado por un hongo que lo invade de entusiasmo micológico –y de un deseo irrefrenable por convencer a los seres humanos de que los hongos tienen unas ganas tremendas de asociarse con nosotros en formas nuevas y peculiares–. Fui a verlo a su casa, en la costa oeste de Canadá. La vivienda pende en equilibrio sobre un risco de granito, con vistas al mar. El tejado se sostiene sobre vigas que parecen láminas de seta. Stamets, fan de *Star*

*Trek* desde que tenía 12 años, bautizó a su casa como Starship Agarikon –el agárico es otro nombre para el *Laricifomes officinalis*, un hongo xilófago medicinal que crece en la región del Pacífico Noroeste.

Conozco a Stamets desde que yo era adolescente, y ha sido uno de los culpables de que me interesara por los hongos. Cada vez que le veo me recibe con una ráfaga de emocionantes novedades sobre hongos. En cuestión de minutos su incontinencia verbal se acelera y salta de una noticia a otra casi atropellándose en un torrente incesante de entusiasmo por los hongos. En su mundo, las soluciones fúngicas están desbocadas. Basta con darle un problema sin solución para que te proponga una nueva manera para descomponerlo, envenenarlo o curarlo con la ayuda de un hongo. Casi siempre lleva un sombrero de *amadou* –un material similar al fieltro que se hace con el cuerpo fructífero del hongo yesquero, o *Fomes fomentarius,* otro hongo de la podredumbre blanca–. Y claro, aquí tampoco pueden faltar las asociaciones oportunas. El *amadou* lo utilizaron los seres humanos para prender fuego durante miles de años –lo llevaba el Hombre de Hielo, el cuerpo de 5000 años de antigüedad conservado en hielo de glaciar–. Como herramienta de combustión (termal), es uno de los ejemplos más antiguos de micología radical humana conocidos hasta la fecha.

Poco antes de mi llegada, el equipo creativo de la serie de televisión *Star Trek: Discovery* había contactado con Stamets para conocer mejor su trabajo. Él había quedado que les explicaría de qué maneras se podrían utilizar los hongos para salvar mundos. Como era de esperar, *Star Trek: Discovery*, intercala temas micológicos en sus tramas; además, cuenta con un personaje –un magnífico *astromicólogo* llamado teniente Paul Stamets– que utiliza los hongos para desarrollar tecnologías poderosas para salvar a la humanidad de una serie de amenazas catastróficas. El equipo de *Star Trek* se ha tomado muchas licencias, pero tampoco es que las necesite. Al acceder a redes intergalácticas de micelio –«un número infinito de carreteras que conducen a todas partes»– el Stamets (de la ficción) y su equipo resuelven cómo viajar más rápido que la luz en la «nave de micelio». Tras su primera inmersión en el micelio, Stamets regresa, anonadado y transformado: «Me he pasado toda la vida intentando atrapar la esencia del micelio. Y ahora lo he hecho. He visto la red. Todo un universo de posibilidades que jamás soñé que existían».

Uno de los problemas que Stamets (el real) esperaba abordar al colaborar con el equipo de *Star Trek* es el estado de abandono de la micología. El arte imita a la vida y la vida imita al arte. Los héroes astromicólogos de la ficción

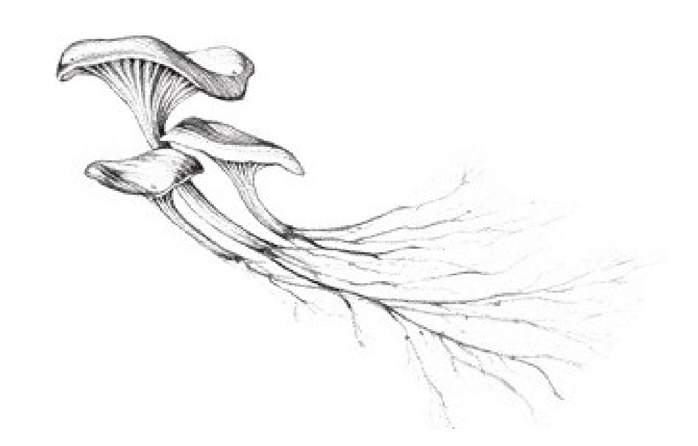
podrían ser capaces de moldear un futuro no de ficción en el que se comprendan los hongos al hacer que una generación de jóvenes se entusiasme por estos. Para Stamets (el real), si se aumenta el interés por los hongos eso podría favorecer el desarrollo de tecnologías micológicas que podrían «ayudar a salvar un planeta que está en peligro».

Cuando me presenté en Starship Agarikon, me encontré a Stamets en el porche jugueteando con un tarro y un plato azul de plástico. Era el prototipo de un comedero de abejas que había inventado. El tarro goteaba agua con azúcar mezclada con extractos de hongos en el plato, al que las abejas llegaban reptando por un conducto. Era su último proyecto; la séptima solución con la que las setas podían ayudar a salvar el mundo. Incluso para los parámetros de Stamets, este proyecto merecía un titular en letras luminosas. Su último ensayo, cuya autoría compartía con entomólogos del laboratorio de abejas de la Universidad Estatal de Washington, había sido aceptado por la prestigiosa publicación *Nature Scientific Reports*. Él y su equipo habían demostrado que se podían utilizar extractos de ciertos hongos de la podredumbre blanca para reducir drásticamente la mortalidad de las abejas.[41]

Aproximadamente una tercera parte de la producción agrícola mundial depende de la polinización de los animales, sobre todo de abejas melíferas, y el descenso abismal de las poblaciones de abejas es uno de los muchos problemas apremiantes que amenazan a la humanidad. Hay bastantes factores que contribuyen al síndrome conocido como problema de colapso de colonias; uno es el empleo masivo de insecticidas; otro, la pérdida del hábitat. Pero el factor más insidioso es el ácaro varroa, llamado apropiadamente *Varroa destructor*; estos ácaros son parásitos que chupan fluido de los cuerpos de las abejas y son portadores de bastantes virus mortíferos.[42]

Los hongos xilófagos son una rica fuente de compuestos antivirales, muchos de los cuales han sido utilizados como medicinas desde tiempos inmemoriales, sobre todo en China. Después de los atentados del 11 de septiembre del 2001, Stamets colaboró con el US National Institute of Health and Department of Defense en el Project BioShield en la búsqueda de compuestos para luchar contra tormentas virales desatadas por terroristas biológicos. De los miles de compuestos probados, algunos de los extractos de hongos de la podredumbre blanca de Stamets tuvieron la actividad más fuerte contra un buen número de virus mortales, incluidos la viruela, el herpes y la gripe. Él había estado produciendo estos extractos para el consumo humano

durante varios años –son, básicamente, estos productos los que han hecho de Fungi Perfecti una empresa multimillonaria–, pero la idea de utilizarlos para tratar a las abejas era una genialidad más reciente.[43]



**Seta ostra, *Pleurotus ostreatus.***

Los efectos de los extractos fúngicos en las infecciones víricas de las abejas eran inequívocos. Al añadir un 1% de extracto de *amadou* (o *Fomes*) y *reishi* (*Ganoderma*, la especie usada para cultivar materiales en Ecovative) al agua azucarada, se redujo hasta 80 veces el virus del ala deformada. Los extractos de *Fomes* redujeron los niveles del virus del lago Sinaí casi 90 veces, y los extractos de *Ganoderma* lo redujeron 45000 veces. Steve Sheppard, un profesor de entomología de la Universidad Estatal de Washington y uno de los colaboradores de Stamets en el ensayo, observó que no había descubierto ninguna otra sustancia que podía prolongar la vida de las abejas hasta este punto.[44]

Stamets me explicó cómo se le ocurrió la idea. Estaba soñando despierto y de repente se cruzaron diferentes líneas de pensamiento que le impactaron «como un rayo». Si los extractos de hongos tenían propiedades antivirales, entonces quizá ayudarían a reducir la carga viral de las abejas –y sí, de hecho, recordó que a finales de la década de 1980 había estado observando a las abejas de sus colmenas que visitaban un montón de virutas de madera en descomposición de su jardín y cómo apartaban las virutas para alimentarse con el micelio que había debajo–. «Oh, dios mío –Stamets desper tó–. Creo que sé cómo salvar a las abejas.» Fue un gran momento, incluso para alguien que se ha pasado décadas inventado soluciones fúngicas para problemas difíciles de resolver.

Es fácil ver el por qué *Star Trek* tomó prestado a Stamets. Su estilo narrativo parece extraído directamente de una película taquillera estadounidense. Muchos de sus estudios presentan a los hongos como héroes, listos para salvar al planeta de una destrucción casi segura. Tormentas virales de proporciones sin precedentes amenazan la seguridad alimentaria en el mundo. Polinizadores vitales siguen bregando bajo la grave amenaza de los parásitos portadores de virus, preparados para causar la hambruna a nivel mundial. El futuro del mundo pende de un hilo. Pero espera un momento ¿Es que….? ¡Sí! Una vez más, los hongos vienen a rescatarnos con la ayuda de su cómplice humano, Stamets.

¿Salvarán los compuestos antivirales producidos por hongos de la podredumbre blanca a las abejas? Los descubrimientos de Stamets prometen pero es demasiado pronto para decir si los extractos fúngicos impedirán que colapsen menos colonias a largo plazo. Los virus son solo uno de los muchos problemas a los que se enfrentan las abejas. No se sabe si los antivirales fúngicos funcionarán igual en otros países y contextos. Y lo que es más importante, para salvar las poblaciones de abejas, la solución de Stamets tiene que aplicarse de forma amplia, una hazaña que espera lograr reclutando los esfuerzos de millones de científicos ‘ciudadanos’.

Fui a la península Olímpica, en el estado de Washington, para visitar las instalaciones de Stamets. La sede central es un conjunto de grandes cobertizos tipo hangar, rodeados de bosque, a kilómetros de distancia de la civilización. Aquí fue donde Stamets cultivó y extrajo los hongos que utilizó para su ensayo. Fue donde tuvo que ‘aumentar’ pronto la producción para llevar el producto a un mercado más amplio. A los pocos meses de la publicación del estudio de las abejas, había recibido decenas de miles de pedidos del BeMushroomed Feeder. Incapaz de atender toda la demanda, Stamets planea comercializar el diseño para impresoras 3D con la esperanza de que otros empiecen a manufacturarlos.

Conocí a uno de los jefes de operaciones y me mostró las instalaciones. El código de vestimenta era estricto: sin zapatos, una bata blanca y una redecilla para el pelo –también había para la barba–. Nos vestimos y atravesamos varias puertas dobles diseñadas para impedir la entrada de aire contaminado desde el exterior.

Entramos a las salas de fructificación, que eran cálidas y húmedas, con el aire denso y empalagoso. Había hileras de estantes flanqueados por bolsas de plástico transparente con micelio apelmazado de las que salían todo tipo de protuberancias llamativas, desde leñosas setas *reishi* con sus relucientes sombreros castaños a la seta melena de león, empujando por las bolsas como delicados corales color crema. En la sala de fructificación de las setas *reishi*, el aire estaba tan cargado de esporas que hasta podía saborear su delicado y húmedo amargor. A los dos minutos de estar en la sala, mis manos estaban cubiertas de una capa de color tostado.

Una vez más, los seres humanos se estaban desviviendo por desviar toneladas de alimento hacia las redes de hongos. Una vez más, una crisis global se estaba convirtiendo en un conjunto de oportunidades para los hongos. Como el reto al que se enfrentó el micelio del *Pleurotus* parado en los lindes de un charco de residuos tóxicos, las soluciones de la micología radical no son tanto de inventar como de recordar. En alguna parte del genoma del *Pleurotus* quizá hay una enzima que hará el trabajo. Quizá ya haya hecho el trabajo antes. Quizá no, pero puede ser readaptada para servir a una causa nueva. De la misma manera, en algún lugar de la historia de la vida puede haber una capacidad o relación del hongo que sea capaz de servir de inspiración para una nueva, y a la vez antigua, solución a uno de nuestros muchos problemas apremiantes. Pensé en la historia de las abejas. Stamets tuvo la idea genial cuando recordó algo que había visto décadas atrás –abejas que parecían estar medicándose con hongos–, no ‘descubrió’ la idea de curar las abejas con hongos. Suponemos que lo hicieron las abejas durante una pelea bioquímica con virus en un húmedo rincón de su historia compartida. En algún lugar sepultado bajo la pila de compost psico-espiritual de su mundo ideal, Stamets metabolizó una vieja solución de micología radical en una nueva.

Entré en las salas de cultivo, repletas de estantes de 3 m de altura. Eran los panales de hongos. Miles de bolsas cargadas con bloques mullidos de micelio peludo llenaban el espacio. Algunos eran blancos, otros amarillentos, y otros naranja pálido. Si los ventiladores que filtran el aire se detuvieran, escucharía la agitación de millones de kilómetros de micelio hurgando en busca de comida. Después de la cosecha, las bolsas con micelio fueron sacadas en grandes barriles llenos de alcohol para producir la cura para las abejas. Como pasa con tantas

soluciones de micología radical, todavía no es seguro; son los primeros pasos, delicados, hacia la posibilidad de supervivencia asegurada del uno con el otro, simbiosis en su más tierna infancia.

# 8

## LA LÓGICA DE LOS HONGOS

*Importa qué historias cuentan historias, qué conceptos analizan conceptos… qué sistemas sistematizan sistemas.*

**DONNA HARAWAY**

Los hongos que comparten la historia más íntima con los seres humanos son las levaduras. Estas viven en nuestra piel, nuestros pulmones y nuestro tracto gastrointestinal, y revisten nuestros orificios. Los cuerpos humanos han evolucionado para regular estas poblaciones, y lo han estado haciendo así durante largos tramos de nuestra historia evolutiva. Además, durante miles de años, las diferentes culturas han desarrollado maneras sofisticadas para regular poblaciones de levadura fuera de nuestros cuerpos, en barriles y tarros.[1] Hoy, las levaduras son los organismos modelo más ampliamente estudiados en biología celular y genética: son las envolturas más sencillas de vida eucariota, y muchos genes humanos tienen sus equivalentes en levaduras. En 1996, la *Saccharomyces cerevisiae*, la especie de levadura empleada para elaborar cerveza pero también pan se convirtió en el primer organismo eucariota en tener su genoma secuenciado. Desde el 2010, más de una cuarta parte de los premios Nobel de Fisiología o Medicina han sido otorgados por trabajos con levadura. Y aun así, no fue hasta el siglo XIX que se descubrió que las levaduras son organismos microscópicos.[2]

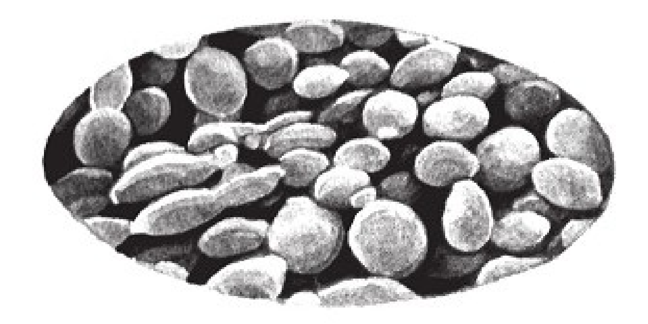
Cuándo empezaron exactamente los humanos a trabajar con levadura sigue siendo una cuestión sin resolver. La primera prueba inequívoca data de hace unos 9000 años, en China, pero se han encontrado granos microscópicos de almidón en herramientas de piedra en Kenia de 100 000 años de antigüedad. La forma de los granos de almidón sugiere que las herramientas habían sido empleadas para trabajar la «palmera del vino africana», *Hyphaene petersiana*, que aún se utiliza para elaborar licor. Dado que cualquier líquido dejado reposar

con azúcar durante más de un día empezará a fermentar por sí solo, es probable que los seres humanos hayan estado elaborando alcohol durante mucho más tiempo.[3]

Las levaduras supervisan la transformación del azúcar en alcohol; el antropólogo Claude Lévi-Strauss decía que además supervisaron una de las transformaciones culturales más espectaculares de la historia del hombre: el paso de ser cazadores-recolectores a convertirse en agricultores. Consideró que el hidromiel –una bebida hecha de miel fermentada– fue la primera bebida alcohólica e imaginó la transición de la fermentación «natural» a «la elaboración de alcohol» cultural valiéndose del ejemplo de un árbol hueco: el alcohol era parte de la naturaleza si la miel había fermentado «por sí sola», y parte de la cultura si los seres humanos habían colocado la miel para que fermentara en un tronco vaciado artificialmente. (Es una interesante distinción; por extensión, las termitas *Macrotermes* y las hormigas cortadoras de hojas hicieron la transición de la naturaleza a la cultura 10 millones de años antes que los humanos.)[4]

Quizá Lévi-Strauss esté equivocado con lo del hidromiel, o quizá no. Sin embargo, la levadura semejante a la actual levadura para elaborar alcohol apareció más o menos al mismo tiempo que la domesticación de cabras y ovejas. Los orígenes de la agricultura hace unos 12000 años –la llamada Transición del Neolítico– pueden ser entendidos, al menos en parte, como una reacción cultural a la levadura. Ya fuera de la mano del pan o de la cerveza, los humanos empezaron a abandonar sus estilos de vida nómadas y se establecieron en sociedades sedentarias (la hipótesis de la cerveza antes que el pan ha ido ganando paulatinamente terreno entre los intelectuales desde la década de 1980). Y ya fuera por el pan o por la cerveza, las levaduras fueron las principales beneficiarias de los primeros pasos del hombre en el terreno agrícola. Para preparar una u otro, los seres humanos alimentan primero a la levadura y después se alimentan ellos. Los desarrollos culturales asociados a la agricultura –desde los campos de labranza a las ciudades, la acumulación de riqueza, los graneros y las enfermedades nuevas– forman parte de nuestra historia compartida con la levadura; se podría hasta razonar que, en muchos sentidos, las levaduras nos han domesticado.[5]

Mi relación con la levadura experimentó una transformación en la universidad. Una de mis vecinas tenía un novio que la visitaba a menudo, y sin falta, al poco tiempo de llegar, aparecieron grandes boles de plástico llenos de líquido y cubiertos con film de plástico transparente en los alféizares de la cocina. Me dijo que era vino. Un amigo suyo que había pasado un tiempo en una prisión en la Guayana Francesa le enseñó a elaborar alcohol. Me quedé sin habla pero pronto ya tuve mi propia colección de boles. Resultó ser muy sencillo. La levadura lo hace casi todo. Le gusta estar calentita, pero no demasiado, y se reproduce más alegremente a oscuras. La fermentación arranca cuando añades levadura a una solución tibia con azúcar. Y a falta de oxígeno, la levadura convierte el azúcar en alcohol y suelta dióxido de carbono. La fermentación se detiene cuando la levadura se queda sin azúcar o muere por envenenamiento de alcohol.



**Levadura de cerveza, *Saccharomyces cerevisiae.***

Llené un bol con zumo de manzana, eché un par de cucharaditas de levadura seca del pan y lo dejé junto al radiador de mi dormitorio. Vi como aparecían capas de espuma y la cobertura de film transparente se hinchaba como una burbuja. De vez en cuando se escapaba un chorrito de gas, soltando vapores cada vez más alcohólicos. A las tres semanas ya no podía aguantar más y me llevé el bol a una fiesta, donde desapareció en cuestión de minutos. Se podía beber aunque era un pelín dulce y, a juzgar por sus efectos, tenía un porcentaje de alcohol similar al de una cerveza fuerte.

Las cosas se aceleraron. A los dos años ya disponía de varias tinas grandes de destilación, incluida una cacerola de 50 litros, y había empezado a elaborar bebidas a partir de recetas que encontré en textos históricos. Había hidromieles con especias, cuyas recetas saqué del *The Closet of Sir Kenelm Digby*, publicado en 1669, y cervezas *gruit* medievales hechas con mirto de Brabante que recogí en un pantano cercano. Poco después les siguieron vinos de majuelo, cervezas de

ortigas y una cerveza medicinal registrada en el siglo XVII por el Dr. William Butler, el protomédico de Jacobo I de Inglaterra, al parecer un remedio que curaba de todo, desde la «peste de Londres» al sarampión y «dolencias de índole diversa». Mi habitación estaba llena de barriles con líquidos gaseosos y mi armario estaba hasta arriba de botellas.[6]

Fermenté la misma fruta con cultivos de levaduras recogidas en lugares distintos. Algunos eran ricos y sabrosos; otros, turbios y deliciosos; incluso los había que sabían a calcetines o aguarrás. La línea entre la fetidez y la fragancia era muy fina, pero a mí me daba igual. La fermentación me permitió acceder a los mundos invisibles de estos hongos, y me encantaba poder saborear las diferencias entre levaduras recogidas en pieles de manzana o reunidas en platos de agua con azúcar dejados toda la noche en estanterías de viejas bibliotecas.

El poder transformador de la levadura hace mucho tiempo que ha estado personificado como una energía divina, un espíritu o un dios. ¿Cómo podría escapar a este tratamiento? El alcohol y la embriaguez constituyen algunas de las magias más antiguas, y existe una fuerza invisible que hace aparecer vino de la fruta, cerveza del grano e hidromiel del néctar. Estos líquidos alteran nuestras mentes y han sido abrazados de formas muy diversas en las culturas humanas: desde festines rituales al arte de gobernar o a moneda para pagar una jornada laboral. Durante un tiempo igual de largo, ellas nos han nublado los sentidos, por el desenfreno y el éxtasis. Las levaduras son tanto creadoras como rompedoras de órdenes sociales humanos.

Los antiguos sumerios –que dejaron escritas recetas de cerveza hace 5000 años– adoraban a una diosa de la fermentación, Ninkasi. En el egipcio *Libro de los Muertos*, las oraciones se dirigen a los «donadores de pan y cerveza». Entre el pueblo chortís de Sudamérica, el comienzo de la fermentación se entendía como «el nacimiento del espíritu bueno». Y los antiguos griegos tenían a Dioniso, que era el dios del vino, de la elaboración del vino, de la locura, de la embriaguez y de la fruta domesticada en general, toda una personificación del poder del alcohol para forjar y corroer categorías culturales humanas.[7]

Hoy, las levaduras se han convertido en herramientas biotecnológicas diseñadas para producir fármacos, desde insulina a vacunas. Bolt Threads, una empresa que trabaja con Ecovative para producir cuero de micelio, ha manipulado levaduras genéticamente para producir seda de araña. Los investigadores trabajan para modificar metabolismos de la levadura para permitirles hacer azúcar a partir de material leñoso de las plantas para usar en

biocombustibles. Un equipo trabaja en el proyecto Sc2.0, una levadura sintética diseñada por humanos construida desde cero –una forma de vida artificial que los ingenieros podrán programar para producir una gran cantidad de compuestos–. En todos estos casos, la levadura con su poder transformador desdibuja la línea entre naturaleza y cultura, entre un organismo que se organiza a sí mismo y una máquina que se construye.[8]

En mis experimentos, aprendí que el arte de elaborar alcohol conlleva una negociación sutil con los cultivos de levadura. La fermentación es descomposición domesticada –putrefacción realojada–. De tener éxito, el resultado terminaría en el lado correcto de la línea, pero como suele pasar con los hongos, nada puede darse por sentado; si cuidaba la limpieza, la temperatura y los ingredientes –importantes factores que pueden decidir las posibles rutas que la fermentación tomará– podría conducir la fermentación por direcciones prometedoras, aunque sin obligarla. Por esta razón, el resultado era siempre sorprendente.

Era divertido beberse muchos de los brebajes históricos: los hidromieles provocaban la risa; las cervezas *gruit* hacían que la gente hablara por los codos; la cerveza del Dr. Butler inducía a un peculiar abatimiento agradable; y algunas botellas encerraban verdaderas pifias. Independientemente de sus efectos, estaba encantado con el proceso de convertir textos históricos en realidad. Las antiguas recetas para elaborar alcohol son anotaciones sobre cómo las levaduras han dejado una impronta en las vidas y mentes de los hombres durante los últimos siglos. En todas las páginas de estos libros, las levaduras son compañeros silenciosos, colaboradores invisibles en la cultura de los hombres. En definitiva, estas recetas eran historias para dar sentido a la descomposición de las sustancias. Me recordaron lo importantes que son las historias que empleamos para darle sentido al mundo. La historia que escuches sobre un grano determina si acabarás con pan o con cerveza, la historia que escuches sobre la leche determina si acabarás con yogur o con queso, y la historia que escuches sobre manzanas determina si acabarás con salsa o con sidra.

Las levaduras son microscópicas, y eso hace más fácil desarrollar un denso sedimento narrativo en torno a sus vidas. Los hongos que fructifican setas han sido entendidos en general en términos más sencillos. Es sabido desde hace mucho tiempo que las setas pueden ser deliciosas pero también pueden

envenenarte, curarte, alimentarte o provocarte alucinaciones. Durante siglos, los poetas de Asia oriental han escrito rapsodias sobre setas y sus sabores. «Oh *matsutake*: / La excitación antes de encontrarlos», se entusiasmaba Yamaguchi Sodo en el siglo XVII, en Japón. Los escritores europeos, en su conjunto, han sido más dubitativos. Albertus Magnus, en su *De Vegetabilibus*, del siglo XIII, advertía que las setas «de cierto tipo» podrían «bloquear los procesos mentales en la cabeza de las criaturas (que las comen) y provocarles la demencia». John Gerard, advirtiendo a sus lectores que se mantuvieran totalmente alejados, escribió en 1597:

> Pocas setas son buenas para comer y la mayoría asfixian y ahogan al comensal. Por lo tanto, aconsejo a aquellos que se pierden por semejantes y novedosas carnosidades tengan cuidado si van a lamer miel entre espinos para que el dulzor de unos no le despisten de la agudeza y el aguijonazo de otros.

Pero los seres humanos nunca se alejaron.[9]

En 1957, Gordon Wasson –el primero en popularizar las «setas mágicas» en el artículo que se publicó ese mismo año en la revista *Life*– y su esposa Valentina desarrollaron un sistema binario para poder clasificar todas las culturas: «micofílica» (culturas devotas de los hongos) al contrario de «micofóbica» (culturas temerosas de los hongos). Los Wasson especularon que las actitudes culturales de hoy hacia las setas eran un «eco actual» de ancestrales cultos de setas psicodélicas. Las culturas micofílicas descendían de aquellas que habían venerado a las setas. Las culturas micofóbicas procedían de aquellas que habían temido su poder diabólico. Las actitudes micofílicas quizá llevaron a Yamaguchi Sodo a escribir poemas elogiando el *matsutake*, o a instar a Terence McKenna a hacer proselitismo de los beneficios de ingerir dosis generosas de setas psilocibinas. Las actitudes micofóbicas quizá alimentaron un pánico moral que desembocó en su ilegalización, o motivar a Albertus Magnus y John Gerard para publicar duras advertencias sobre los peligros de estas «novedosas carnosidades». Las dos posiciones reconocen el poder de las setas para afectar las vidas de la gente, ambas dan sentido a este poder aunque de formas diferentes.[10]

Siempre estamos encasillando organismos en categorías cuestionables. Es una de las formas para darles sentido. En el siglo XIX, se clasificó a las bacterias y hongos como plantas.[11] Y aunque hoy se reconoce que cada uno pertenece a su propio reino de vida, se tuvo que esperar hasta mediados de la década de 1960

para que lograran su independencia. Durante buena parte de la historia documentada del hombre ha habido poco consenso sobre lo que los hongos son en realidad.[12]

Teofrasto, un discípulo de Aristóteles, escribió sobre trufas, pero solo pudo decir lo que no eran: las describió por no tener raíz, ni tallo, ni rama, ni capullo, ni hoja, ni flor, ni fruto, ni corteza, ni mesocarpio, ni fibras, ni venas. Según la opinión de otros escritores clásicos, las setas se generaban espontáneamente por los impactos de los rayos. Para otros, eran vástagos de la Tierra, o «excrecencias». Carl Linnaeus, el botánico sueco de los siglos XVIII que concibió el sistema de la taxonomía moderna, escribió en 1751: «El orden de los hongos sigue siendo caos, un escándalo del arte, sin botánico alguno que sepa lo que es una especie y lo que es una variedad».[13]

Hasta el día de hoy, los hongos se escurren por los sistemas de clasificación que construimos para ellos. El sistema de taxonomía de Linnaeus fue concebido para animales y plantas, y no encaja fácilmente con hongos, líquenes o bacterias. Una sola especie de hongo puede adquirir formas que no se parecen en nada unas con otras, y muchas especies no tienen características distintivas que puedan utilizarse para definir su identidad. Los avances en la secuenciación de genes permiten ordenarlos en grupos con una historia evolutiva compartida en lugar de colocarlos en grupos basándose en sus rasgos físicos. Sin embargo, decidir dónde empieza una especie y dónde termina otra basándonos en datos genéticos plantea tantos problemas como los que resuelve. En el micelio de un solo hongo 'individuo' pueden existir múltiples genomas. En el ADN extraído a una única pizca de polvo habrá decenas de miles de firmas genéticas únicas, pero de ninguna manera podríamos asignarlas a grupos conocidos de hongos. En el 2013, en un artículo titulado «Contra la denominación de los hongos», el micólogo Nicholas Money fue más lejos al sugerir que debería abandonarse totalmente el concepto de especie fúngica.[14]

Los sistemas de clasificación son solo una de las maneras que la gente tiene para darle sentido al mundo. Otra son los juicios de valor absolutos. La nieta de Charles Darwin, Gwen Raverat, describió la repugnancia que le daba a su tía Etty –la hija de Darwin– la seta falo hediondo, *Phallus impudicus*. Estas setas no están bien vistas por su forma fálica; además, producen una baba apestosa pero que atrae a las moscas, las cuales ayudan a dispersar las esporas. En 1952, Raverat recordaba:[15]

En nuestros bosques autóctonos crece un tipo de seta venenosa llamada en lengua coloquial «El cuerno apestoso» (aunque en latín tiene un nombre aún más grosero, si cabe). El nombre queda justificado porque basta seguir el olor que desprende para encontrarla, y ahí radica el gran invento de la tía Etty. Equipada con una cesta y un palo puntiagudo, y vestida con un gabán de caza y unos guantes, se abría paso por el bosque siguiendo su olfato, deteniéndose aquí y allá, agitando sus fosas nasales cuando percibía el tufillo de su presa. Acto seguido, se abalanzaba sobre su víctima y pinchaba el cuerpo pútrido para depositarlo en el cesto. Cuando terminaba su ejercicio diario, regresaba a casa con la recolecta y la quemaba discretamente en la chimenea de la salita con la puerta cerrada –para salvaguardar la moralidad de las sirvientas.

¿Cruzada o fetiche? ¿Micofobia o micofilia a escondidas? La diferencia no siempre es fácil de explicar. Para tratarse de alguien a quien le repulsaban los falos hediondos, la tía Etty se pasó más tiempo que nadie buscándolos. En su ‘ejercicio’, ella era la que indudablemente había dispersado mejor las esporas de los falos hediondos, mucho mejor que una nube de moscas. La desagradable pestilencia, irresistible para las moscas, demostró ser también irresistible para la tía Etty –aunque su atracción fue refractada hacia la repulsión–; motivada por su horror, envolvió los falos hediondos con moralidad victoriana y se convirtió en una apasionada recluta de la causa fúngica.

Las formas en las que intentamos dar sentido a los hongos a menudo nos aportan tanto de nosotros mismos como de los hongos que intentamos comprender. El champiñón amarilleante *(Agaricus xanthodermus)* se suele describir en las guías de campo como venenoso. Un aplicado buscador de setas con una gran biblioteca micológica me contó en su día que tenía un antiguo manual de setas, en el que este champiñón se describía como «delicioso, cuando se freía», aunque el autor añadía una reflexión posterior: que dicha seta «puede causar un ligero coma a aquellos con una constitución débil». Qué sentido le das al champiñón amarilleante depende de tu constitución fisiológica. Aunque venenoso para la mayoría, hay quien puede comerlo sin enfermar. Cómo se describe dependerá de la fisiología de la persona que lo describa.[16]

Este tipo de tendencia es especialmente evidente en los debates sobre relaciones simbióticas, que han sido entendidas en términos humanos desde que la palabra se acuñó por primera vez a finales del siglo XIX. Las analogías utilizadas para dar sentido a los líquenes y los hongos micorrícicos ya lo dicen todo. Amo y esclavo, infiel y cornudo, seres humanos y organismos domesticados, hombres y mujeres, las relaciones diplomáticas entre países… Las metáforas cambian con

el paso del tiempo, pero los intentos por disfrazar las relaciones que se extienden mucho más allá que el ser humano con categorías humanas continúan hasta nuestros días.

Tal y como me explicó el historiador Jan Sapp, el concepto de simbiosis se comporta como un prisma que a menudo dispersa nuestros propios valores sociales. Sapp habla muy rápido pero sabe de qué habla y es muy agudo con los detalles irónicos. La historia de la simbiosis es su especialidad. Se ha pasado décadas con biólogos, en laboratorios, convenciones, simposios y selvas, mientras estos lidiaban con cuestiones sobre cómo los organismos interactúan entre sí. Un buen amigo de Lynn Margulis y Joshua Lederberg, ha visto desde primera fila cómo la moderna ciencia de la microbiología 'ha crecido'. La política de la simbiosis siempre ha sido tensa. La naturaleza, en esencia, ¿es competitiva o cooperativa? Muchas cosas dependen de esta cuestión. Para un gran número de estudiosos, eso cambia la forma de comprendernos. No sorprende que estas cuestiones sigan siendo un polvorín conceptual e ideológico.[17]

Desde el desarrollo de la teoría de la evolución en el siglo XIX, el discurso dominante en Estados Unidos y Europa occidental fue de conflicto y competición, y reflejó las visiones del progreso social dentro del sistema capitalista industrial. Ejemplos de organismos que cooperan entre sí para su mutuo beneficio «se quedaron cerca de los márgenes de la educada sociedad biológica», en palabras de Sapp. Las relaciones de mutualismo, como las que favorecieron la aparición de líquenes, o las relaciones de plantas con hongos micorrícios, fueron curiosas excepciones a la regla –en los pocos casos donde se reconoció siquiera su existencia.[18]

Lo opuesto a este punto de vista no recayó nítidamente en las líneas que separan Este y Oeste. Eso sí, las ideas de ayuda mutua y de cooperación en la evolución ocuparon un lugar más destacado en Rusia que en los círculos evolucionistas de Europa occidental. La estocada más fuerte a la visión de la descarnada ley del más fuerte la asestó el anarquista ruso Piotr Kropotkin en su libro más vendido *El apoyo mutuo, un factor de la evolución*, en 1902. En él, enfatizaba que la «sociabilidad» era tan parte de la naturaleza como lo es la lucha por la existencia. Basado en su interpretación de la naturaleza, defendía un mensaje claro: «¡No compitas! ¡Practica la ayuda mutua! Es el medio más seguro de dar al otro y a todos los demás la mayor seguridad, la mejor garantía de existencia y progreso, corporal, intelectual y moralmente».[19]

Durante casi todo el siglo XX, el debate sobre interacciones simbióticas siguió estando lleno de carga política. Sapp apunta que la Guerra Fría empujó a los biólogos a tomarse más en serio la cuestión de la coexistencia en el mundo en general. La primera convención internacional sobre simbiosis se celebró en Londres en 1963, seis meses después que la crisis de los misiles en Cuba abocara al mundo al borde de una guerra nuclear. Y no fue por casualidad. Los relatores de los actos de la convención comentaron que «los problemas urgentes de coexistencia en los asuntos internacionales pueden haber influido a la comisión para que eligiera el tema de la convención de este año».[20]

En el mundo de la ciencia está muy arraigado que las metáforas pueden ayudar a generar nuevas formas de pensamiento. El bioquímico Joseph Needham propuso una lograda analogía con una «red de coordenadas» que podía ser utilizada para ordenar una masa de información que, de otra manera, sería informe, igual que un escultor utiliza una estructura de alambre para sostener la arcilla húmeda. El biólogo evolutivo Richard Lewontin señaló que es imposible «hacer el trabajo de la ciencia» sin utilizar metáforas porque «casi todo el cuerpo de la ciencia moderna es un intento por explicar fenómenos que el ser humano no puede experimentar directamente». Las metáforas y, después, las analogías, vienen entrelazadas con historias y valores humanos, de modo que ningún debate sobre ideas científicas –ni siquiera este– puede estar libre de las tendencias culturales.[21]

Hoy, el estudio de redes micorrícicas compartidas es uno de los campos que más acusa un bagaje político. Hay quien retrata estos sistemas como una especie de socialismo que redistribuye la riqueza del bosque. Otros se inspiran en las estructuras familiares y el cuidado parental de los mamíferos, con árboles jóvenes que son nutridos por 'árboles madre' más viejos y grandes vía las conexiones fúngicas. Y hasta los hay que describen las redes en términos de «mercados biológicos» donde plantas y hongos son retratados como individuos económicos lógicos que comercian en el suelo de una bolsa ecológica de valores donde se involucran en «sanciones financieras», «inversiones comerciales estratégicas» y «ganancias mercantiles».[22]

La Wood Wide Web no es un término menos antropomórfico. Los humanos no son los únicos organismos que construyen máquinas, pero internet y la World Wide Web son algunas de las tecnologías más manifiestamente politizadas que existen hoy. Utilizar metáforas de máquinas para comprender otros organismos puede ser tan problemático como tomar prestados conceptos de las vidas sociales

de los seres humanos. En realidad, los organismos crecen; las máquinas se construyen. Los organismos continuamente se rehacen a sí mismos; las máquinas son mantenidas por los seres humanos. Los organismos se organizan a sí mismos; las máquinas las organizan los seres humanos. Las metáforas de máquinas son conjuntos de historias y herramientas que han ayudado a realizar infinidad de descubrimientos que nos han cambiado la vida, pero no son hechos científicos, y nos pueden meter en líos cuando les damos prioridad sobre otros tipos de historia. Si vemos a los organismos como máquinas, será más probable que los tratemos como tales.[23]

Solo *a posteriori* podemos ver qué metáforas son más útiles. Hoy sería absurdo intentar meter a todos los hongos en categorías de «agentes de enfermedades» o «parásitos», como se hacía a finales del siglo XIX. Incluso antes de que los líquenes hubieran llevado a Albert Frank a acuñar la palabra «simbiosis», no había otra forma de describir las relaciones entre diferentes tipos de organismos. En los últimos años, se ha conseguido matizar más el discurso que rodea las relaciones simbióticas. Toby Spribille –el investigador que descubrió que los líquenes consisten en más de dos integrantes– defiende que se debe entender a los líquenes como sistemas. Los líquenes no parecen ser el producto de una asociación fija, como se había pensado desde hacía mucho tiempo; más bien surgen a partir de distintas relaciones posibles entre un número diferente de participantes. Para Spribille, las relaciones que apuntalan los líquenes se han convertido en una pregunta, y no en una respuesta conocida de antemano.

De igual modo, ya no se piensa en plantas y hongos micorrícicos como organismos que se comportan de forma mutualista o parasitaria. Incluso en la relación entre un único hongo micorrícico y una sola planta, el intercambio es fluido. En lugar de una dicotomía rígida, los investigadores describen un *continuum* de mutualismo a parasitismo. Las redes micorrícicas compartidas pueden facilitar la cooperación y también la competición. Los nutrientes se pueden mover por el suelo por conexiones fúngicas, pero también los venenos. Las posibilidades narrativas son más ricas. Tenemos que cambiar de perspectivas y encontrar la comodidad en –o soportar– la incertidumbre.

Sin embargo, aún los hay que disfrutan politizando el debate. Sapp comentó jocoso, sobre un biólogo en particular, que «me llama la izquierda de la biología, y a sí mismo, la derecha de la biología». Habían estado analizando la idea de individuos biológicos y, según Sapp, los avances en las ciencias microbianas

habían complicado el poder definir los límites de un organismo individual; en cambio, para su detractor, quien se había posicionado en la derecha de la biología, los individuos claros tenían que existir. El pensamiento capitalista moderno se basa en la idea de individuos racionales actuando para su propio interés. Sin individuos, todo se derrumbaría. Desde su perspectiva, el argumento de Sapp escondía una debilidad por los colectivos y una tendencia socialista subyacente. Sapp se río: «Hay gente a la que solo le gusta hacer dicotomías artificiales».[24]

En *Braiding Sweetgrass*, la bióloga Robin Wall Kimmerer escribe acerca de una palabra del idioma potawatomi de los nativos americanos, «*puhpowee*», que se traduce como «la fuerza que empuja a las setas a crecer de la tierra por la noche». Kimmerer recuerda que ella, más tarde, aprendió que «*puhpowee* no solo se utiliza para las setas sino también para ciertos miembros masculinos que crecen misteriosamente por la noche». ¿Es antropomórfico describir el afloramiento de una seta con las mismas palabras que usamos para describir la excitación humana sexual masculina? ¿O es micomórfico describir la excitación humana sexual masculina con los mismos términos que utilizamos para describir el crecimiento de una seta? ¿Hacia qué dirección apunta la flecha? Si tú dices que una planta «aprende», «decide», «comunica» o «recuerda», ¿estás humanizando la planta, o vegetalizando un conjunto de conceptos humanos? El concepto humano podría adquirir nuevos significados cuando se aplica a una planta, de la misma manera que los conceptos vegetales podrían adquirir nuevos significados cuando se aplican a un ser humano: florecer, verse bien, robusto, raíz, con mucha savia, radical…[25]

Natasha Myers, la antropóloga que introdujo la palabra «*involution*» para describir la tendencia de los organismos a asociarse entre sí, señala que Charles Darwin parecía bastante preparado para vegetalizarse a sí mismo, para practicar el «fitomorfismo». Al escribir sobre orquídeas en 1862, Darwin observó: «La posición de las antenas en esta *Catasetum* puede compararse a la de un hombre con el brazo izquierdo levantado y doblado para que su mano quedara delante de su pecho, y con el brazo derecho que cruza a su cuerpo por debajo para que los dedos sobresalgan un poco por su lado izquierdo».[26]¿Está Darwin humanizando la flor, o está siendo vegetalizado por la flor? Está describiendo los trazos de la

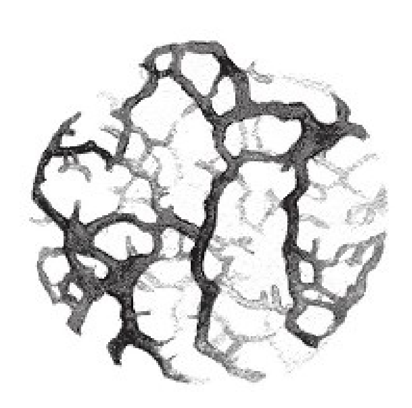
planta en términos humanos, una señal clara de antropomorfismo. Pero también está dando forma floral al cuerpo masculino –incluido el suyo–, sugiriendo que está abierto para explorar la anatomía de la flor en sus propios términos.

Esto ya es un clásico: es difícil darle sentido a algo sin contagiarse con una pequeña parte de ese algo. A veces es intencionado. Radical Mycology, por ejemplo, es una organización sin una forma bien definida, y esto no es por casualidad, su fundador, Peter McCoy, señala que los hongos tienen el poder de cambiar nuestra forma de pensar e imaginar. Se crean árboles con ramificaciones para todo, desde nuestras representaciones genealógicas y de relaciones (ya sean familias humanas, biológicas o lingüísticas) hasta las estructuras arbóreas de datos en la ciencia de la computación, o las «dendritas» en los sistemas nerviosos (de *dendron*, árbol en griego). ¿Por qué no debería hacerlo el micelio? Radical Mycology se organiza a sí misma usando la lógica descentralizada del micelio. Las redes periféricas se asocian, en líneas generales, a un movimiento mayor. Y periódicamente, la red de Radical Mycology se fusiona en un cuerpo fructífero, como el del Radical Mycology Convergence al que asistí en Oregón. ¿Cómo de diferentes serían nuestras sociedades e instituciones si pensáramos en hongos, en lugar de en animales o plantas, como formas de vida ‘representativas’?[27]

A veces imitamos el mundo sin ser conscientes de ello. Los dueños de perros a menudo se parecen a sus mascotas; los biólogos a menudo pasan a comportarse como la materia que estudian. Desde que Frank acuñó por primera vez el término «simbiosis» a finales del siglo XIX, los investigadores que estudian las relaciones entre organismos han sido persuadidos para que establezcan atípicas colaboraciones entre disciplinas. Tal y como Jan Sapp me señaló, fue la poca disposición a atreverse a dar el salto entre los límites institucionales la que contribuyó a que se desatendieran las relaciones simbióticas durante buena parte del siglo XX. A medida que las ciencias se especializaban más, los abismos entre disciplinas separaron a los genetistas de los embriólogos, a los botánicos de los zoólogos, a los microbiólogos de los fisiólogos.

Las interacciones simbióticas rebasan las fronteras de las especies; y los estudios de las interacciones simbióticas deben rebasar las fronteras que imponen las disciplinas. Sin embargo, por increíble que parezca, hoy esto no ocurre. «Compartir recursos para el beneficio mutuo: la comunicación cruzada entre disciplinas aumenta el entendimiento de las simbiosis micorrícicas…» Así

empecé una reseña crítica de la convención internacional sobre biología micorrícica en el 2018. El estudio de los hongos micorrícicos necesita de una simbiosis académica entre micólogos y botánicos, y el estudio de las bacterias que viven en las hifas de los hongos necesita de las interacciones simbióticas entre micólogos y bacteriólogos.[28]



Siempre me pasa que cuando investigo a los hongos, me comporto como ellos y enseguida me involucro en mutualismos académicos basados en un intercambio de favores y de datos. En Panamá, actué como si fuera un delantero del crecimiento del micelio micorrícico, cubierto de barro rojo hasta los codos durante varios días sin parar. Y ansiosamente transporté grandes refrigeradores con muestras a otros países encontrándome aduanas, escáneres de rayos X y perros rastreadores. Los examiné al microscopio en Alemania, escruté los perfiles de los lípidos de los hongos en Suecia y extraje y secuencié el ADN de los hongos en Inglaterra. Envié *gigabytes* de datos vomitados por una máquina en Cambridge para que fueran procesados en Suecia, y después los envié a mis colaboradores en Estados Unidos y Bélgica. Si mis movimientos hubieran dejado un rastro tras de sí, habría trazado una red compleja, en la que no faltaría el movimiento bidireccional de información y recursos. Al igual que las plantas, mis colaboradores en Suecia y Alemania pudieron acceder a un mayor volumen de suelo al asociarse conmigo. Y como ellos no podían ir a los trópicos en persona, amplié su alcance. Y a cambio, al igual que un hongo, pude acceder a fondos y técnicas que, de otra manera, hubieran permanecido fuera de mi alcance. Mis colaboradores en Panamá se beneficiaron de las subvenciones y las experiencia técnicas de mis colegas en Inglaterra. Y mis colegas en Inglaterra se

beneficiaron de las subvenciones y experiencia de mis colaboradores panameños. Para estudiar una red flexible, tuve que montar una red flexible. Es un tema que se repite: mira a la red y esta empieza a mirarte a ti.

«La embriaguez –escribe el teórico francés Gilles Deleuze– es un estallido victorioso de la planta en nuestro interior.» Es también una erupción no menos victoriosa del hongo en nuestro interior. ¿Puede la intoxicación ayudarnos a descubrir partes de nosotros mismos en el mundo de los hongos? ¿Habría maneras de darle sentido a los hongos si nos desamarráramos de nuestra naturaleza humana, o encontráramos en esta naturaleza humana una pizca de algo más, algo fúngico? Este algo más podría ser una traza o dos de una época en la que estábamos más íntimamente relacionados con los hongos. O quizá algo que hemos aprendido en nuestra larga y enmarañada historia junto a estas criaturas extraordinarias.[29]

Hace unos 10 millones de años, la enzima que utiliza nuestro cuerpo para neutralizar el alcohol, conocida como alcohol deshidrogenasa, o ADH4, se sometió a una mutación sencilla que multiplicó por 40 su efectividad. La mutación se produjo en el último antecesor común que compartimos con gorilas, chimpancés y bonobos. Sin una ADH4 modificada, hasta la más mínima cantidad de alcohol sería venenosa. Con una ADH4 modificada, nuestro cuerpo puede consumir alcohol sin peligro y utilizarlo como una fuente de energía. Mucho antes de que nuestros antepasados homínidos se convirtieran en humanos, y mucho antes de que creáramos argumentos para darle un sentido cultural y espiritual al alcohol, y a los cultivos de levadura que lo producen, desarrollamos las enzimas para darle un sentido metabólico.[30]

¿Por qué aparecería la capacidad para metabolizar el alcohol tantos millones de años antes que los humanos desarrollaran tecnologías para la fermentación? Los científicos señalan que la ADH4 mejoró su efectividad cuando nuestros antecesores primates empezaron a pasar menos tiempo en los árboles para adaptarse a la vida en el suelo. Y especulan que la capacidad para metabolizar alcohol desempeñó un papel crucial en la capacidad de los primates para buscarse la vida en el suelo del bosque al incluir una nueva casilla en su dieta: la fruta demasiado madura y fermentada caída de los árboles.

La mutación de la ADH4 apoya la «hipótesis del mono ebrio», propuesta por el biólogo Robert Dudley para explicar los orígenes de esa debilidad de los humanos por el alcohol. Según este punto de vista, los humanos nos sentimos tentados por el alcohol porque nuestros antecesores primates ya lo estuvieron. La fragancia del alcohol producido por levaduras era una manera fiable para encontrar fruta madura mientras se pudría en el suelo. Tanto nuestra atracción humana por el alcohol como toda la ecología de dioses y diosas que supervisan la fermentación y la embriaguez son vestigios de una fascinación mucho más antigua.[31]

Los primates no son los únicos animales atraídos por el alcohol. Las tupayas –mamíferos pequeños con colas vaporosas– trepan hasta los capullos de las flores de las palmeras *Eugeissona tristis* y beben el néctar fermentado en cantidades que, si comparásemos el peso de su cuerpo a escala, intoxicaría a un ser humano. La nube de vapores alcohólicos producidos por las levaduras atrae a las tupayas hasta las flores de las palmeras. Las *Eugeissona tristis* dependen de las tupayas para polinizarlas y sus capullos han evolucionado hasta convertirse en recipientes especializados en fermentación –estructuras que albergan comunidades de levadura e incentivan una fermentación tan rápida que su néctar espumea y burbujea–; las tupayas, por su parte, han desarrollado una capacidad extraordinaria para neutralizar el alcohol y parecen no sufrir efectos etílicos adversos.[32]

La mutación en la ADH4 ayudó a nuestros antecesores primates a extraer energía del alcohol. En una vuelta de tuerca a la hipótesis del mono ebrio, los humanos siguen buscando maneras para extraer energía del alcohol, aunque lo quemamos como biocombustible en máquinas de combustión en lugar de como combustible metabólico en nuestros cuerpos. Cada año se producen miles de millones de litros de biocombustible de etanol a partir del maíz en Estados Unidos y de la caña de azúcar en Brasil. En Estados Unidos se emplea una superficie más grande que Inglaterra para cultivar el maíz que es procesado para dar de comer a la levadura. El índice de conversión de praderas en cultivos de biocombustible es comparable al de la deforestación, por porcentaje de superficie terrestre, en Brasil, Malasia e Indonesia. Las consecuencias ecológicas del *boom* del biocombustible no hay que tomárselas a la ligera: se necesitan grandes subvenciones de los gobiernos; la conversión de praderas en campos de cultivo libera enormes cantidades de carbono a la atmósfera; un volumen considerable de fertilizantes se vierte en arroyos y ríos provocando que exista la

zona muerta del golfo de México. Y una vez más, las levaduras y el ambiguo poder del alcohol que producen están participando en la transformación humana de la agricultura.[33]

Animado por la hipótesis del mono ebrio, me propuse fermentar frutas demasiado maduras. Sería una manera de consumar un relato, de dejar que modificaran mis percepciones del mundo, de tomar decisiones bajo su influencia, de ser intoxicado por ellas. La embriaguez puede ser la erupción del hongo en nosotros; esta sería la erupción de una historia fúngica. Cuántas veces las historias cambian nuestras percepciones, y cuántas veces ni siquiera nos damos cuenta.

La idea se me ocurrió mientras estaba de visita por el Jardín Botánico de la Universidad de Cambridge guiada por su carismático director. En su compañía, hasta del arbusto más insignificante emanaban nubes de historias. Una planta, un gran manzano que había cerca de la entrada, sobresalía. Creció, según nos dijeron, de un esqueje de un manzano de 400 años del jardín de la casa familiar de Isaac Newton, Woolsthorpe Manor. Era el único manzano que creció allí, y era lo bastante viejo para haber presenciado el momento en el que a Newton se le ocurrió su teoría de la gravitación universal. De haber un árbol que dejó caer la manzana que inspiró a Newton, era este.

Al crecer a partir de un esqueje, el árbol que teníamos delante era, nos recordó el director, un clon del famoso árbol. Este esqueje creó, al menos genéticamente, el mismo árbol que había logrado la hazaña. Mejor dicho, que *habría logrado* la hazaña si esta hubiera ocurrido. Rápidamente nos aseguró que como la historia de la manzana no se sostenía sobre una base sólida, era poco probable que una manzana participara, ni por asomo, en la teoría de la gravitación. Sin embargo, este era, con diferencia, el candidato más probable del árbol que inspiró la teoría de la gravitación pero que *no* dejó caer la manzana.

Pero este no era el único clon. El director nos dijo que había dos más: uno en el lugar donde estaba el laboratorio de alquimia de Newton, delante del Trinity College, y el otro delante de la Facultad de Matemáticas. (Más tarde trascendió que había más, como el del jardín del presidente en el Massachusetts Institute of Technology, entre otros sitios.) El mito era lo bastante potente para hacer que tres comisiones académicas independientes –caracterizadas por su prudencia e indecisión sobre todas las cosasdecidieran plantar los árboles en

lugares propicios de la localidad. Todo este tiempo, la postura oficial siguió siendo la misma: la historia de la manzana de Newton era apócrifa y no se sostenía sobre un hecho comprobado.

Como ejemplo de teatro botánico, no hay casi nada que lo supere. La implicación de una planta en uno de los avances teóricos más significativos en la historia del pensamiento occidental estaba siendo confirmada y desmentida *al mismo tiempo*. De esta ambigüedad crecieron árboles de verdad, con manzanas de verdad, que cayeron al suelo y se descompusieron creando un galimatías acre de alcohol.

La historia de la manzana de Newton es apócrifa porque ni siquiera Newton dejó constancia escrita de la experiencia. No obstante, hay varias versiones de la historia registradas por contemporáneos suyos. El documento más detallado lo escribió William Stukeley, un colega joven de la Royal Society y anticuario más conocido hoy por sus trabajos sobre los círculos de piedras en Gran Bretaña. En 1726, Stukeley recordaba que él y Newton habían comido juntos en Londres:[34]

> Hacía calor cuando acabamos de cenar, salimos al jardín y bebimos té debajo de un manzano; únicamente él y yo […]. Entre otros temas de conversación, me comentó que justo se hallaba en la misma situación que cuando se le ocurrió la idea de la gravitación. Por qué esa manzana debería caer siempre perpendicularmente al suelo, reflexionó; estando sentado en modo contemplativo, le inspiró la caída de una manzana. ¿Por qué no caen de lado, o hacia arriba? ¿Sino que siempre caen hacia el centro de la Tierra? Ciertamente la razón es que la Tierra las atrae. Debe haber una fuerza de atracción en juego.

La historia moderna de la manzana de Newton es una historia sobre la historia de lo que dijo Newton. Esto es lo que hizo a los árboles tan ricos narrativamente. De todas formas, no se pudo verificar la historia. Como reacción a esta disyuntiva, los académicos actuaron como si fuera verdad pero también mentira. La historia entraba y salía de la leyenda. A los árboles se les endosó una narrativa imposible, un ejemplo de cómo los organismos no humanos fuerzan las costuras de nuestras categorías hasta un punto de ruptura. Que una manzana inspirase, en realidad, a Newton a formular su teoría de la gravitación ya hacía mucho tiempo que había dejado de importar. Los árboles crecieron; la historia prosperó.

Con educación le pedí al director si podía coger algunas manzanas del árbol. Ni por asomo pensé que esto podría ser un problema. Se nos había explicado que las manzanas –«Flor de Kent», una variedad poco comúntenían un sabor desagradable. El director nos explicó que el sabor se debía a su particular

combinación de acidez y amargor, una mezcla que algunos compararon al agrio carácter de Newton durante los últimos años de su vida. Me quedé sorprendido de recibir un no rotundo como respuesta, y pregunté por qué. «Los turistas tienen que ver cómo las manzanas caen del árbol –me confesó el director disculpándose– para añadir verosimilitud al mito.»

¿Quién estaba tomando el pelo a quién? ¿Cómo podía haber tantas personas respetables tan intoxicadas por una historia, tan consoladas por ella, tan constreñidas por ella, tan embelesadas con ella, tan cegadas por ella? Y una vez más, ¿cómo no iban a estarlo? Si las historias se cuentan para modificar nuestras percepciones del mundo, es raro que *no* nos hagan todas estas cosas. Pero no es muy común descubrir una situación donde la absurdidad es tan evidente, donde obligan a una planta a hacernos reír de una forma tan evidente. Recogí una de las manzanas que estaban en el suelo descomponiéndose, olí el alcohol, y decidí que esta sería mi fruta putrefacta.

El problema era que no tenía forma de exprimir las manzanas para hacer zumo. Lo busqué en internet y leí una noticia sobre un barrio residencial de Cambridge que tenía problemas con las manzanas. Los manzanos del vecindario dejaban caer la fruta a la calle, ensuciándola, y los jovencitos del barrio las utilizaban como misiles; como consecuencia, se habían roto ventanas y abollado coches. En una astuta maniobra política, una asociación de vecinos había facilitado una prensa para manzanas a la comunidad para que pudieran gestionar el problema y reducir residuos. Parecía que había funcionado. La violencia vecinal se había convertido en zumo. El zumo fermentó y se convirtió en sidra. Y la sidra al beberla fomentó el espíritu de comunidad. El principio era sensato. Una crisis humana estaba siendo descompuesta por un hongo. Y de una manera más, los humanos se estaban organizando para desviar residuos hacia los expectantes apetitos de los hongos. Acto seguido, los metabolismos de los hongos estaban repercutiendo en las vidas y la cultura de los seres humanos. Cerveza, penicilina, psilocibina, LSD, biocombustibles… ¿Cuántas veces había ocurrido esto antes?

Contacté con el responsable de la prensa para que me pusiera en la cola. Estaba muy solicitada y se pasaba directamente entre solicitantes. Me pusieron en contacto con un vicario local quien, dos días más tarde, colocó el distinguido artefacto a remolque de un Volvo hecho polvo. El aparato tenía un aspecto

despiadado, con engranajes dentados para masticar las manzanas y convertirlas en pulpa, un gran tornillo para aplicar presión, y un caño para que el zumo saliera.

Con un amigo y grandes mochilas salimos a recolectar las manzanas de Newton por la noche. Dejamos algunas frutas en el árbol por el bien del mito, aunque siento decir que escapamos con la inmensa mayoría. Más tarde descubrí que estábamos «robando fruta» –de «*scrumping*», una palabra dialectal procedente del West Country que se utilizaba para describir la fruta caída y el saqueo sin permiso de la misma–. La diferencia radicaba en que en el West Country las manzanas daban sidra y la sidra daba dinero: los terratenientes solían incluir una pinta diaria de sidra como parte de la paga a sus jornaleros, una de las muchas maneras en las que los metabolismos de las levaduras repercutieron en los sistemas agrícolas hechos para albergarlas. Debajo del árbol de Newton, sin embargo, las manzanas eran señal de suciedad y un engorro para el jardinero. La prensa ejercía su magia: presionaba residuos para hacer zumo, y el zumo fermentaba en sidra. Una situación en la que todos ganan.

Prensar las manzanas costaba lo suyo. Se necesitaban dos o tres personas para sujetar la prensa, y una para girar la manivela. Mientras la prensa devoraba las manzanas, dos personas se encargaban de lavarlas y trocearlas. Se creó una cadena de producción. La sala se impregnó de un olor intenso y enmohecido de manzanas machacadas; había manzanas por todas partes, en varios estados; teníamos pulpa en el pelo, y la ropa estaba empapada; la moqueta estaba pegajosa y mojada, y había manchas en las paredes. Al final del día, teníamos 30 litros de zumo.

Cuando fermentes sidra, te vas a enfrentar a un dilema. O añades un cultivo de levadura que ya viene preparado en un paquete, o no añades nada y dejas que la levadura natural de las pieles de manzana hagan su trabajo. La piel de cada variedad de manzana tiene su propio cultivo de levadura, que fermenta cada uno a su ritmo, conservando y transformando preferentemente diferentes elementos del sabor de la fruta. Como pasa en cualquier fermentación, la línea es muy fina, y si se cuelan levaduras o bacterias intrusas, el zumo se pudre. Una sidra elaborada con una sola cepa cultivada que viene en un paquete será menos probable que se corrompa y se pudra, pero no representará los propios cultivos de levadura de las manzanas. No hay ninguna duda de que las levaduras silvestres tendrían que manejar este proceso. Las manzanas de Newton ya venían

espolvoreadas con levadura de Newton. Yo no tendría forma de saber exactamente qué cepas de levadura acabarían dirigiendo la fermentación, pero así había sido durante buena parte de la historia de la humanidad.

El zumo fermentó en unas dos semanas, resultando en un líquido turbio e intenso, que embotellé. Lo dejé reposar unos días y me serví una copa. Para mi sorpresa, estaba delicioso. El amargor y la acidez de las manzanas se había transformado. El sabor era floral y delicado, seco con ligeras notas gaseosas. Bebido en grandes cantidades, provocaba elación y una euforia discreta. No noté esa confusión de emociones que sentía después de beberme otras sidras. Ni me sentía torpe, aunque la levadura realmente me había atontado. Estaba intoxicado por una historia, consolado por ella, restringido por ella, disuelto en ella, atontado por ella, agobiado por ella. Llamé «Gravity»a la sidra, y me dejé caer, pesado y tambaleante, bajo la influencia del prodigioso metabolismo de la levadura.

# EPÍLOGO

## Este compost

*Nuestras manos absorben como raíces, de modo que las coloco en lo bonito de este mundo.*

**SAN FRANCISCO DE ASÍS**

Cuando era niño, me encantaba el otoño. Un gran castaño dejaba caer las hojas que se amontonaban en el jardín. Con un rastrillo las juntaba en una pila que cuidaba con cariño y, con el paso de las semanas, y ayudándome de los brazos, llevaba hojas nuevas que añadía al montón. Al poco tiempo, podría haber llenado bañeras con la hojarasca amontonada. Una y otra vez me zambullía en ese montón de hojarasca dejándome caer desde las ramas inferiores del árbol. Una vez dentro, me escurría hasta estar totalmente sepultado y así permanecía entre el susurro de las hojas, perdido entre olores curiosos.

Mi padre me animó a zambullirme de cabeza en el mundo. Solía llevarme sobre sus hombros y sumergir mi cara en las flores como si yo fuera una abeja. Seguramente polinizamos infinidad de flores mientras pasábamos de una planta a otra, con mis mejillas manchadas de amarillo y naranja, y mientras apretujaba mi cara en los pabellones que formaban los pétalos, pero ambos estábamos en la gloria con los colores, los olores y el estropicio.

Mis pilas de hojarasca no solo eran escondites sino también mundos por descubrir. Pero, con el paso de los meses, las pilas se encogían y ya no era tan fácil sumergirme en ellas. Me puse a investigar el porqué y para ello llegué a las regiones más profundas del montón, retirando puñados mojados de lo que cada vez se parecía más a suelo y menos a hojas. Los gusanos hicieron acto de presencia. ¿Subían el suelo a las capas superiores de la pila o bajaban las hojas al suelo? Nunca lo tuve claro. Tenía la sensación de que el montón de hojas se estaba hundiendo, pero, de ser así ¿hacia qué se estaba hundiendo?¿Qué profundidad tenía el suelo? ¿Qué era lo que mantenía el mundo a flote en este océano sólido?

Se lo preguntaba a mi padre y él me respondía. Y yo le contestaba con otro ¿«por qué»? No importa cuántas veces le preguntara porque él siempre tenía una respuesta. Estos jueguecitos del «por qué» continuaron hasta que me cansé. Fue en uno de estos arrebatos que aprendí lo que era la descomposición. Me costaba imaginarme a criaturas invisibles comiendo todas las hojas, y cómo seres tan pequeños podían tener tamaña voracidad. Se me hacía difícil imaginar cómo podían devorar mis pilas de hojas estando yo sepultado en ellas. ¿Por qué era incapaz de ver cómo ocurría? Si su hambre era tan feroz, ¿podría pillarlos en el acto si me sumergía en el montón de hojas y allí me quedaba inmóvil el tiempo suficiente? Siempre me eludieron.

Mi padre me propuso un experimento. Cortamos el cuello de una botella de plástico transparente. En el interior de la botella alternamos capas de suelo, arena, hojarasca y, al final, un puñado de lombrices. Con el paso de los días, observé que los gusanos se abrían paso entre las capas. Las mezclaban y revolvían. Nada estaba quieto. La arena se coló en el suelo, y las hojas en la arena. Las líneas definidas de las capas acabaron desdibujándose. Mi padre me dijo que, aunque podamos ver a los gusanos, hay muchas más criaturas que se comportan igual pero que no podemos ver. Gusanos minúsculos. Y criaturas más pequeñas que los gusanos minúsculos. Y criaturas aún más pequeñas que ni siquiera parecen gusanos pero son capaces de mezclar y revolver, y disolver una cosa con otra, igual que los gusanos. Los compositores hacen piezas de música. Pero estos eran descomponedores, deshacían trozos de vida. Nada podía ocurrir sin ellos.

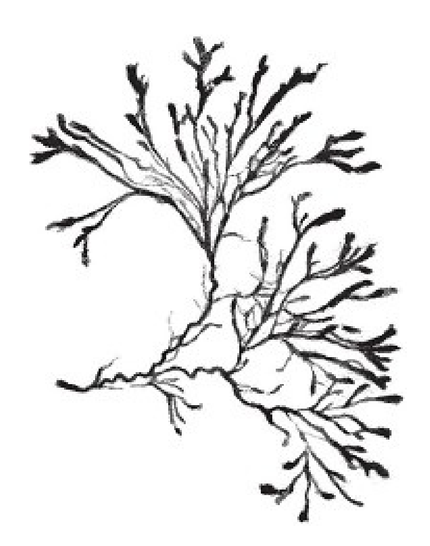
Esa idea sí que me fue útil. Era como si se me hubiera mostrado cómo retroceder, cómo pensar al revés. Ahora había flechas que apuntaban en ambas direcciones a la vez. Los compositores hacen; los descomponedores deshacen. Y si estos no deshacen nada, los compositores no tienen nada *con* lo que hacer. Con esta reflexión empecé a entender el mundo de otra manera. Y a partir de esta reflexión, a partir de mi fascinación por las criaturas que descomponen, creció mi interés por los hongos.

Y es a partir de este montón compostado de preguntas y fascinaciones que se ha compuesto este libro. Ha habido tantas preguntas y tan pocas respuestas..., pero eso le añade emoción. La ambigüedad ya no me inquieta como antes; para mí es más fácil resistir la tentación a remediar la incertidumbre con certidumbre. En mis conversaciones con investigadores y entusiastas me he descubierto a mí mismo actuando como un intermediario sin quererlo, respondiendo preguntas

sobre lo que la gente hace en campos diferentes y remotos de la investigación micológica, unas veces aportando granitos de arena al suelo, y otras, paladas de suelo a la arena. Tengo más polen en la cara que cuando empecé. Nuevos porqués han aterrizado sobre viejos porqués. Hay una nueva pila en la que zambullirse, y su olor es tan misterioso como al principio. Pero hay más humedad, más espacio en el que sumergirme, y más por descubrir.

Puede que los hongos hagan setas, pero primero deben deshacer algo más. Ahora que este libro ya está hecho, puedo cedérselo a los hongos para que lo deshagan. Humedeceré un ejemplar y lo sembraré con micelio de *Pleurotus*. Cuando haya recorrido con glotonería las palabras y páginas y guardas, y hayan brotado setas ostra de las cubiertas, me las comeré. De otro ejemplar quitaré las páginas, haré un puré con ellas y con la ayuda de un ácido suave separaré la celulosa del papel para convertirla en azúcares. Y a esta solución de azúcar añadiré una levadura. Cuando ya haya fermentado y se haya convertido en cerveza, me la beberé y completaré el ciclo.

Los hongos hacen mundos; pero también los deshacen. Hay muchas maneras de pillarlos en el acto: cuando preparas una sopa de setas, o cuando te la comes; cuando sales a buscar setas o cuando las compras; cuando fermentas alcohol, plantas una planta o simplemente entierras tus manos en el suelo. Y tanto si permites que un hongo entre en tu mente como si te maravillas de cómo lo hace en la mente de otro, tanto si te curas con un hongo como si ves a otro curarse con la ayuda de un hongo, tanto si construyes tu propia casa con hongos o empiezas a cultivar setas en tu casa, los hongos *te* pillarán en el acto. Si estás vivo, es que ya te han pillado.



## AGRADECIMIENTOS

Sin la guía, los conocimientos y la paciente ayuda de muchos expertos, intelectuales, investigadores y entusiastas, no habría podido concebir este libro. En especial, me gustaría dar las gracias a: Ralph Abraham, Andrew Adamatzky, Phil Ayres, Eben Bayer, Kevin Beiler, Luis Beltran, Michael Beug, Martin Bidartondo, Lynne Boddy, Ulf Büntgen, Duncan Cameron, Keith Clay, Yves Couder, Bryn Dentinger, Julie Deslippe, Katie Field, Emmanuel Fort, Mark Fricker, Maria Giovanna Galliani, Lucy Gilbert, Rufino Gonzales, Trevor Goward, Christian Gronau, Omar Hernández, Allen Herre, David Hibbett, Stephan Imhof, David Johnson, Toby Kiers, Callum Kingwell, Albert László-Barábasi, Natuschka Lee, Charles Lefevre, Egbert Leigh, David Luke, Scott Mangan, Michael Marder, Peter McCoy, Dennis McKenna, Pål Axel Olsson, Stefan Olsson, Magnus Rath, Alan Rayner, David Read, Dan Revillini, Marcus Roper, Jan Sapp, Carolina Sarmiento, Justin Schaffer, Jason Scott, Marc-André Selosse, Jason Slot, Sameh Soliman, Toby Spribille, Paul Stamets, Michael Stusser, Anna Tsing, Raskal Turbeville, Ben Turner, Milton Wainwright, Håkan Wallander, Joe Wright y Camilo Zalamea.

Mi agente Jessica Woollard y mis editores Will Hammond de Bodley Head y Hilary Redmon de Random House no han dejado de animarme ni de ofrecerme una visión clara y sabios consejos por lo que les estoy inmensamente agradecido. En Bodley Head/Vintage he tenido la suerte de trabajar con Graham Coster, Suzanne Dean, Sophie Painter y Joe Pickering, y en Random House he contado con un equipo excelente formado por Karla Eoff, Lucas Heinrich, Tim O’Brian, Simon Sullivan, Molly Turpin y Ada Yonenaka. Collin Elder experimentó con tinta hecha de la seta matacandil y creó una preciosa colección de ilustraciones de hongos. Por ayudarme a traducir algunas piezas, le doy las gracias a Xavier Buxton, Julia Hart, Anna Westermeier, Simi Freund y Pete Riley. Pam Smart me aportó una ayuda valiosa con la transcripción, y Chris Morris con su colección de imágenes de esporas «Spores for Thought». Christian Ziegler se unió a mí en el bosque de Panamá y fue capaz de fotografiar la extraña magia de las plantas micoheterotróficas.

Estoy tremendamente agradecido a aquellos que han leído partes o la totalidad del libro en diferentes fases de su creación: Leo Amiel, Angelika Cawdor, Nadia Chaney, Monique Charlesworth, Libby Davy, Tom Evans, Charles Foster, Simi Freund, Stephan Harding, Ian Henderson, Johnny Lifschutz, Robert Macfarlane, Barnaby Martin, Uta Paszkowski, Jeremy Prynne, Jill Purce, Pete Riley, Erin Robinsong, Nicholas Rosenstock, Will Sapp, Emma Sayer, Rupert Sheldrake, Cosmo Sheldrake, Sara Sjölund, Teddy St Aubyn, Erik Verbruggen y Flora Wallace. No hubiera podido hacerlo sin su visión y sensibilidad únicas.

Por haberme animado, cuidado e inspirado por el camino, quiero dar las gracias a: David Abram, Mileece Abson, Matthew Barley, Fawn Baron, Finn Beames, Gerry Brady, Dean Broderick, Caroline Casey, Udavi Cruz-Márquez, Mike de Danann Datura, Lindy Dufferin, Andréa de Keijzer, Zac Embree, Amanda Feilding, Johnny Flynn, Tom Fortes Mayer, Viktor Frankel, Dana Frederick, Charlie Gilmour, Lucy Hinton, Rick Ingrasci, James Keay, Oliver Kelhammer, Erica Kohn, Natalie Lawrence, Sam Lee, Andy Letcher, Jane Longman, Luis Eduardo Luna, Robert Macfarlane, Vahakn Matossian, Sean Matteson, Evan McGown, Zayn Mohammed, Mark Morey, Misha Mullov-Abbado, Viktoria Mullova, Charlie Murphy, Dan Nicholson, Richard Perl, Sara Perl Egendorf, John Preston, Jeremy Prynne, Anthony Ramsay, Vilma Ramsay, Steve Rooke, Gryphon Rower Upjohn, Matt Segall, Rupinder Sidhu, Wayne Silby, Paulo Roberto Silva e Souza, Joel Solomon, Anne Stillman, Peggy Taylor, Robert Temple, Jeremy Thres, Mark Vonesch, Flora Wallace, Andrew Weil, Khari WendellMcClelland, Kate Whitley, Heather Wolf y Jon Young. Quiero mostrar mi gratitud a los muchos profesores y mentores maravillosos que me han ayudado a lo largo de los años, en especial a: Patricia Fara, William Foster, Howard Griffiths, David Hanke, Nick Jardine, Mike Majerus, Oliver Rackham, Fergus Read, Simon Schaffer, Ed Tanner y Louis Vause.

Quiero agradecer el apoyo de varias instituciones: Clare College, Cambridge; Departamento de Ciencias de las Plantas y el Departamento de Historia y Filosofía de la Ciencia, ambos en Cambridge, donde pasé unos años emocionantes; Smithsonian Tropical Research Institute, por su ayuda cuando viví en Panamá y por sus perseverantes cuidados del Barro Colorado Nature Monument; y a Hollyhock, Columbia Británica, por facilitarme un precioso lugar de trabajo durante el invierno.

Incontables horas de música me han ayudado a pensar y a tantear el camino

a lo largo de este libro. A destacar la música de: el pueblo aka, Johann Sebastian Bach, William Byrd, Miles Davis, João Gilberto, Billie Holiday, Charles Mingus, Thelonius Monk, Moondog, Bud Powell, Thomas Tallis, Fats Waller y Teddy Wilson. Los dos lugares que más me han guiado para que apareciera este libro son Hampstead Heath y la isla Cortes de la costa de Columbia Británica. A estos lugares, y a todos los que habitamos y protegemos, les debo más de lo que puedo expresar con palabras. Por encima de todo, quiero dar las gracias, por su inspiración, amor, sensatez, sabiduría, generosidad e infinita paciencia a Erin Robinsong, Cosmo Sheldrake, y a mis padres, Jill Purce y Rupert Sheldrake.

El autor y el editor agradecen encarecidamente a los propietarios del *copyright* que nos hayan permitido reproducir fragmentos del siguiente material: «Heaven is Jealous» de *A Year With Hafiz: Daily Contemplations*, traducción © Daniel Ladinsky 2011; «Like Roots» de *Love Poems From God: Twelve Sacred Voices From the East and West*, traducción © Daniel Ladinsky 2002; «Fayan Wenyi» de «The Book of Silences» de *Selected Poems* © Robert Bringhurst 2009; *Green Grass*, letra y música de Kathleen Brennan y Thomas Waits © 2004 Jalma Music. Universal Music Publishing MGB Limited. Todos los derechos reservados. *Copyright* internacional asegurado. Utilizado con permiso de Hal Leonard Europe Limited; «A New Year Greeting» © The Estate of W. H. Auden.

Ilustraciones del texto © Collin Elder 2020. Agradecimiento encarecido por permitir reproducir la imagen «Diferentes tipos de micelio. Redibujado a partir de Fries (1943)», redibujada por Collin Elder de una imagen original © Symbolae.

# BIBLIOGRAFÍA


Aanen, D. K., Eggleton, P., Rouland-Lefevre, C., Guldberg-Froslev, T., Rosendahl, S., Boomsma, J. J., «The evolution of fungus-growing termites and their mutualistic fungal symbionts», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (2002), pp. 14887-14892.

Aasved, M. J., *Alcohol, drinking and intoxication in preindustrial societies: Theoretical, nutritional, and religious considerations*, tesis doctoral, Universidad de California en Santa Bárbara (1988).

Abadeh, A., Lew. R. R., «Mass flow and velocity profiles in *Neurospora* hyphae: partial plug flow dominates intra-hyphal transport», *Microbiology*, 159 (2013), pp. 2386-2394.

Achatz, M., Rillig, M. C., «Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae enhance transport of the allelochemical juglone in the field», *Soil Biology and Biochemistry*, 78 (2014), pp. 76-82.

Adachi, K., Chiba, K., «FTY720 story. Its discovery and the following accelerated development of sphingosine i-phosphate receptor agonists as immunomodulators based on reverse pharmacology», *Perspectives in Medicinal Chemistry*, 1 (2007), pp. 11-23.

Adamatzky, A., *Advances in Physarum Machines* (Springer International Publishing, 2016).

Adamatzky, A., «Towards fungal computer», *Journal of the Royal Society Interface Focus*, 8 (2018a), 20180029.

Adamatzky, A., «On spiking behaviour of oyster fungi *Pleurotus djamor*», *Scientific Reports*, 8 (2018b), 7873.

Adamatzky, A., «A brief history of liquid computers», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374 (2019), 20180372.

Ahmadjian, V., Heikkilä, H., «The culture and synthesis of *Endocarpon pusillum* and *Staurothele clopima*», *Lichenologist*, 4 (1970), pp. 259-267.

Ahmadjian, V., «Lichens are more important than you think», *BioScience*, 45 (1995), p. 123.

Ainsworth, G. C., *Introduction to the History of Mycology* (Cambridge, Cambridge University Press, 1976).

Albert, R., Jeong, H., Barabási, A-L., «Error and attack tolerance of complex networks», *Nature*, 406 (2000), pp. 378-382.

Alberti, S., «Don't go with the cytoplasmic flow», *Developmental Cell*, 34 (2015), pp. 381-382.

Alim, K., Andrew, N., Pringle, A., Brenner, M. P., «Mechanism of signal propagation in *Physarum polycephalum*», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (2017), pp. 5136-5141.

Alim, K., «Fluid flows shaping organism morphology», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373 (2018), 20170112.

Allaway, W., Ashford, A., «Motile tubular vacuoles in extramatrical mycelium and sheath hyphae of ectomycorrhizal systems», *Protoplasma*, 215 (2001), pp. 218-225.

Allen, J., Arthur, J., «Ethnomycology and Distribution of Psilocybin Mushrooms», en R. Metzner ed., *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl*, Rochester, Vermont: Park Street Press (2005), pp. 49-68.

Alpert, C., «Unraveling the Mysteries of the Canadian Whiskey Fungus», *Wired* (2011), www.wired.com/2011/05/ff-angelsshare/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Alpi, A., Amrhein, N., Bertl, A., Blatt, M. R., Blumwald, E., Cervone, F., Dainty, J., Michelis, M., Epstein, E., Galston, A. W. et al., «Plant neurobiology: no brain, no gain?» *Trends in Plant Science*, 12 (2007), pp. 135-136.

Aly, A., Debbab, A., Proksch, P., «Fungal endophytes: unique plant inhabitants with great promises», *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90 (2011), pp. 1829-1845.

Alzarhani, K. A., Clark, D. R., Underwood, G. J., Ford, H., Cotton, A. T., Dumbrell, A. J., «Are drivers of root-associated fungal community structure context specific?» *ISME Journal*, 13 (2019), pp. 1330-1344.

Andersen, S. B., Gerritsma, S., Yusah, K. M., Mayntz, D., Hywel Jones, N. L., Billen, J., Boomsma, J. J., Hughes, D. P., «The life of a dead ant: the expression of an adaptive extended phenotype», *American Naturalist*, 174 (2009), pp. 424-433.

Anderson, J. B., Bruhn, J. N., Kasimer, D., Wang, H., Rodrigue, N., Smith, M. L., «Clonal evolution and genome stability in a 2,500-year-old fungal individual», *Proceedings of the Royal Society B*, 285 (2018), 20182233.

Araldi-Brondolo, S. J., Spraker, J., Shaffer, J. P., Woytenko, E. H., Baltrus, D. A., Gallery, R. E., Arnold, E. A., «Bacterial endosymbionts: master modulators of fungal phenotypes», *Microbiology Spectrum*, 5 (2017), FUNK-0056-2016.

Arnaud-Haond, S., Duarte, C. M., Diaz-Almela, E., Marbà, N., Sintes, T., Serrão, E. A., «Implications of extreme life span in clonal organisms: millenary clones in meadows of the threatened seagrass *Posidonia oceanica*», *PLOS ONE*, 7 (2012), e30454.

Arnold, E. A., Mejía, L., Kyllo, D., Rojas, E. I., Maynard, Z., Robbins, N., Herre, E., «Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100 (2003), pp. 15649-15654.

Arnold, E. A., Miadlikowska, J., Higgins, L. K., Sarvate, S. D., Gugger, P., Way, A., Hofstetter, V., Kauff, F., Lutzoni, F., «A phylogenetic estimation of trophic transition networks for ascomycetous fungi: are lichens cradles of symbiotrophic fungal diversification?», *Systematic Biology*, 58 (2009), pp. 283-297.

Arsenault, C., «Only 60 Years of Farming Left if Soil Degradation Continues», *Scientific American* (2014), www.scientificamerican.com/article/only-60-years-of-farming-left-if-soil-degradation-continues/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Aschenbrenner, I. A., Cernava, T., Berg, G., Grube, M., «Understanding microbial multi-species symbioses», *Frontiers in Microbiology*, 7 (2016), 180.

Asenova, E., Lin, H.-Y., Fu, E., Nicolau, D. V., «Optimal fungal space searching algorithms», *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 15 (2016), pp. 613-618.

Ashford, A. E., Allaway, W. G., «The role of the motile tubular vacuole system in mycorrhizal fungi», *Plant and Soil*, 244 (2002), pp. 177-187.

Averill, C., Dietze, M. C., Bhatnagar, J. M., «Continental-scale nitrogen pollution is shifting forest mycorrhizal associations and soil carbon stocks», *Global Change Biology*, 24 (2018), pp. 4544-4553.

Awan, A. R., Winter, J. M., Turner, D., Shaw, W. M., Suz, L. M., Bradshaw, A. J., Ellis, T., Dentinger, B., «Convergent evolution of psilocybin biosynthesis by psychedelic mushrooms», *bioRxiv* (2018), 374199.

Babikova, Z., Gilbert, L., Bruce, T. J., Birkett, M., Caulfield, J. C., Woodcock, C., Pickett, J. A., Johnson, D., «Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack», *Ecology Letters*, 16 (2013), 835-843.

Bachelot, B., Uriarte, M., McGuire, K. L., Thompson, J., Zimmerman, J., «Arbuscular mycorrhizal fungal diversity and natural enemies promote coexistence of tropical tree species», *Ecology*, 98 (2017), pp. 712-720.

Bader, M.K.-F., Leuzinger, S., «Hydraulic coupling of a leafless kauri tree remnant to conspecific hosts», *iScience*, 19 (2019), pp. 1238-1243.

Bahn, Y.-S., Xue, C., Idnurm, A., Rutherford, J. C., Heitman, J., Cardenas, M. E., «Sensing the environment: lessons from fungi», *Nature Reviews Microbiology*, 5 (2007), pp. 57-69.

Bain, N., Bartolo, D., «Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds», *Science*, 363 (2019) pp. 46-49.

Ball, P., *How to Grow a Human* (Londres, William Collins, 2019).

Banerjee, S., Schlaeppi, K., Van der Heijden, M. G., «Keystone taxa as drivers of microbiome structure and functioning», *Nature Reviews Microbiology*, 16 (2018), pp. 567-576.

Banerjee, S., Walder, F., Büchi, L., Meyer, M., Held, A. Y., Gattinger, A., Keller, T., Charles, R., Van der Heijden, M. G., «Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots», *ISME Journal*, 13 (2019), pp. 1722-1736.

Bar-On, Y. M., Phillips, R., Milo, R., «The biomass distribution on Earth», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (2018), pp. 6506-6511.

Barabási, A. L., Albert, R., «Emergence of scaling in random networks», *Science*, 286 (1999), pp. 509-512.

Barabási, A. L., «The physics of the Web», *Physics World*, 14 (2001), pp. 33-38, physicsworld.com/a/the-physics-of-the-web/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Barabási, A. L., *Linked: How Everything is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life* (Nueva York, Basic Books, 2014).

Barbey, A. K., «Network neuroscience theory of human intelligence», *Trends in Cognitive Sciences*, 22 (2018), pp. 8-20.

Barto, K. E., Hilker, M., Müller, F., Mohney, B. K., Weidenhamer, J. D., Rillig, M. C., «The fungal fast lane: common mycorrhizal networks extend bioactive zones of allelochemicals in soils», *PLOS ONE*, 6 (2011), e27195.

Barto, K. E., Weidenhamer, J. D., Cipollini, D., Rillig, M. C., «Fungal superhighways: do common mycorrhizal networks enhance below ground communication?» *Trends in Plant Science*, 17 (2012), pp. 633-637.

Bascompte, J., «Mutualistic networks», *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 (2009), pp. 429-436.

Baslam, M., Garmendia, I., Goicoechea, N., «Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved growth and nutritional quality of greenhouse-grown lettuce», *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (2011), pp. 5504-5515.

Bass, D., Howe, A., Brown, N., Barton, H., Demidova, M., Michelle, H., Li, L., Sanders, H., Watkinson, S. C., Willcock, S. et al., «Yeast forms dominate fungal diversity in the deep oceans», *Proceedings of the Royal Society B*, 274 (2007), pp. 3069-3077.

Bassett, D. S., Sporns, O., «Network neuroscience», *Nature Neuroscience*, 20 (2017), pp. 353-364.

Bassett, E., Keith, M. S., Armelagos, G., Martin, D., Villanueva, A., «Tetracyclinelabeled human bone from ancient Sudanese Nubia (ad 350)», *Science*, 209 (1980), pp. 1532-1534.

Bateson, B., *William Bateson, Naturalist* (Cambridge, Cambridge University Press, 1928).

Bateson, G., *Steps to an Ecology of Mind* (Northvale, New Jersey, Jason Aronson Inc., 1987).

Bebber, D. P., Hynes, J., Darrah, P. R., Boddy, L., Fricker, M. D., «Biological solutions to transport network design», *Proceedings of the Royal Society B*, 274 (2007), pp. 2307-2315.

Beck, A., Divakar, P., Zhang, N., Molina, M., Struwe, L., «Evidence of ancient horizontal gene transfer between fungi and the terrestrial alga *Trebouxia*», *Organisms Diversity & Evolution*, 15 (2015), pp. 235-248.

Beerling, D., *Making Eden* (Oxford, Oxford University Press, 2019).

Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A., Kretzer, A. M., «Architecture of the wood-wide web: *Rhizopogon* spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts», *New Phytologist*, 185 (2009), pp. 543-553.

Beiler, K. J., Simard, S. W., Durall, D. M., «Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests», *Journal of Ecology*, 103 (2015), pp. 616-628.

Bengtson, S., Rasmussen, B., Ivarsson, M., Muhling, J., Broman, C., Marone, F., Stampanoni, M., Bekker, A., «Fungus-like mycelial fossils in 2.4-billion-year-old vesicular basalt», *Nature Ecology & Evolution*, 1 (2017), 0141.

Bennett, J. A., Cahill, J. F., «Fungal effects on plant-plant interactions contribute to grassland plant abundances: evidence from the field», *Journal of Ecology*, 104 (2016), pp. 755-764.

Bennett, J. A., Maherali, H., Reinhart, K. O., Lekberg, Y., Hart, M. M., Klironomos, J., «Plant – soil feedbacks and mycorrhizal type influence temperate forest population dynamics», *Science*, 355 (2017), pp. 181-184.

Bennett, J. W., Chung, K. T., «Alexander Fleming and the discovery of penicillin», *Advances in Applied Microbiology*, 49 (2001), pp. 163-184.

Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., Bakker, P. A., «The rhizosphere microbiome and plant health», *Trends in Plant Science*, 17 (2012), pp. 478-486.

Bergson, H., *Creative Evolution* (Nueva York, Henry Holt & Company, 1911).
Berthold, T., Centler, F., Hübschmann, T., Remer, R., Thullner, M., Harms, H., Wick, L.Y., «Mycelia as a focal point for horizontal gene transfer among soil bacteria», *Scientific Reports*, 6 (2016), 36390.
Bever, J. D., Richardson, S. C., Lawrence, B. M., Holmes, J., Watson, M., «Preferential allocation to beneficial symbiont with spatial structure maintains mycorrhizal mutualism», *Ecology Letters*, 12 (2009), pp. 13-21.
Bingham, M. A., Simard, S. W., «Mycorrhizal networks affect ectomycorrhizal fungal community similarity between conspecific trees and seedlings», *Mycorrhiza*, 22 (2011), pp. 317-326.
Björkman, E., «*Monotropa hypopitys* L. – an epiparasite on tree roots», *Physiologia Plantarum*, 13 (1960), pp. 308-327.
Boddy, L., Hynes, J., Bebber, D. P., Fricker, M. D., «Saprotrophic cord systems: dispersal mechanisms in space and time», *Mycoscience*, 50 (2009), pp. 9-19.
Bonfante, P., «The future has roots in the past: the ideas and scientists that shaped mycorrhizal research», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 982-995.
Bonfante, P., Desirò, A., «Who lives in a fungus? The diversity, origins and functions of fungal endobacteria living in Mucoromycota», *ISME Journal*, 11 (2017), pp. 1727-1735.
Bonfante, P., Selosse, M.-A., «A glimpse into the past of land plants and of their mycorrhizal affairs: from fossils to evo-devo», *New Phytologist*, 186 (2010), pp. 267-270.
Bonifaci, V., Mehlhorn, K., Varma, G., «*Physarum* can compute shortest paths», *Journal of Theoretical Biology*, 309 (2012), pp. 121-133.
Booth, M. G., «Mycorrhizal networks mediate overstorey-understorey competition in a temperate forest», *Ecology Letters*, 7 (2004), pp. 538-546.
Bordenstein, S. R., Theis, K. R., «Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes», *PLOS Biology*, 13 (2015), e1002226.
Bouchard, F., «Symbiosis, Transient Biological Individuality, and Evolutionary Process», en J. Dupré y J. Nicholson eds., *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology* (Oxford, Oxford University Press, 2018), pp. 186-198.
Boulter, M., *Darwin's Garden: Down House and the Origin of Species* (Londres, Counterpoint, 2010).
Boyce, G. R., Gluck-Thaler, E., Slot, J. C., Stajich, J. E., Davis, W. J., James, T. Y., Cooley, J. R., Panaccione, D. G., Eilenberg, J., Licht, H. H. et al., «Psychoactive plant- and mushroom-associated alkaloids from two behaviour-modifying cicada pathogens», *Fungal Ecology*, 41 (2019), pp. 147-164.
Brand, A., Gow, N. A., «Mechanisms of hypha orientation of fungi», *Current Opinion in Microbiology*, 12 (2009), pp. 350-357.
Brandt, A., De Vera, J. P., Onofri, S., Ott, S., «Viability of the lichen *Xanthoria elegans* and its symbionts after 18 months of space exposure and simulated Mars conditions on the ISS», *International Journal of Astrobiology*, 14 (2014), pp. 411-425.
Brandt, A., Meeßen, J., Jänicke, R. U., Raguse, M., Ott, S., «Simulated space radiation: impact of four different types of high-dose ionizing radiation on the lichen *Xanthoria elegans*», *Astrobiology*, 17 (2017), pp. 136-144.
Bringhurst, R., *Everywhere Being Is Dancing* (Berkeley, California, Counterpoint, 2009).
Brito, I., Goss, M. J., Alho, L., Brígido, C., Van Tuinen, D., Félix, M. R., Carvalho, M., «Agronomic management of AMF functional diversity to overcome biotic and abiotic stresses – the role of plant sequence and intact extraradical mycelium», *Fungal Ecology*, 40 (2018), pp. 72-81.
Bruce-Keller, A. J., Salbaum, M. J., Berthoud, H.-R., «Harnessing gut microbes for mental health: getting from here to there», *Biological Psychiatry*, 83 (2018), pp. 214-223.
Bruggeman, F. J., Van Heeswijk, W. C., Boogerd, F. C., Westerhoff, H. V., «Macromolecular intelligence in micro-organisms», *Biological Chemistry*, 381 (2000), pp. 965-972.
Brundrett, M. C., «Co-evolution of roots and mycorrhizas of land plants», *New Phytologist*, 154 (2002), pp. 275-304.
Brundrett, M. C., Tedersoo, L., «Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant

diversity», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1108-1115.

Brunet, T., Arendt, D., «From damage response to action potentials: early evolution of neural and contractile modules in stem eukaryotes», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 371 (2015), 20150043.

Brunner, I., Fischer, M., Rüthi, J., Stierli, B., Frey, B., «Ability of fungi isolated from plastic debris floating in the shoreline of a lake to degrade plastics», *PLOS ONE*, 13 (2018), e0202047.

Bublitz, D. C., Chadwick, G. L., Magyar, J. S., Sandoz, K. M., Brooks, D. M., Mesnage, S., Ladinsky, M. S., Garber, A. I., Bjorkman, P. J., Orphan, V. J. et al., «Peptidoglycan production by an insect-bacterial mosaic», *Cell*, 179 (2019), pp. 1-10.

Buddie, A. G., Bridge, P. D., Kelley, J., Ryan, M. J., «*Candida keroseneae* sp. nov., a novel contaminant of aviation kerosene», *Letters in Applied Microbiology*, 52 (2011), pp. 70-75. Büdel, B., Vivas, M., Lange, O. L., «Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, México)», *Ecological Processes*, 2 (2013), p. 6.

Buhner, S. H., *Sacred Herbal and Healing Beers* (Boulder, Colorado, Siris Books, 1998).

Buller, A. H. R., *Researches on Fungi*, vol. 4 (Londres, Longmans, Green & Co., 1931).

Büntgen, U., Egli, S., Schneider, L., Von Arx, G., Rigling, A., Camarero, J. J., Sangüesa-Barreda, G., Fischer, C. R., Oliach, D., Bonet, J. A. et al., «Long-term irrigation effects on Spanish holm oak growth and its black truffle symbiont», *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202 (2015), pp. 148-159.

Burford, E. P., Kierans, M., Gadd, G. M., «Geomycology: fungi in mineral substrata», *Mycologist*, 17 (2003), pp. 98-107.

Burkett, W., *Ancient Mystery Cults* (Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1987).

Burr, C., *The Emperor of Scent* (Nueva York, Random House, 2012).

Bushdid, C., Magnasco, M., Vosshall, L., Keller, A., «Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli», *Science*, 343 (2014), pp. 1370-1372.

Cai, Q., Qiao, L., Wang, M., He, B., Lin, F.-M., Palmquist, J., Huang, S.-D., Jin, H., «Plants send small RNAs in extracellular vesicles to fungal pathogen to silence virulence genes», *Science*, 360 (2018), pp. 1126-1129.

Calvo Garzón, P., Keijzer, F., «Plants: adaptive behavior, root-brains, and minimal cognition», *Adaptive Behavior*, 19 (2011), pp. 155-171.

Campbell, B., Ionescu, R., Favors, Z., Ozkan, C. S., Ozkan, M., «Bio-derived, binderless, hierarchically porous carbon anodes for Li-ion batteries», *Scientific Reports*, 5 (2015), 14575.

Caporael, L., «Ergotism: the Satan loosed in Salem?», *Science*, 192 (1976), pp. 21-26.

Carhart-Harris, R. L., Bolstridge, M., Rucker, J., Day, C. M., Erritzoe, D., Kaelen, M., Bloomfield, M., Rickard, J. A., Forbes, B., Feilding, A. et al., «Psilocybin with psychological support for treatment-resistant depression: an open-label feasibility study», *Lancet Psychiatry*, 3 (2016a), 619-627.

Carhart-Harris, R. L., Erritzoe, D., Williams, T., Stone, J., Reed, L. J., Colasanti, A., Tyacke, R. J., Leech, R., Malizia, A. L., Murphy, K. et al., «Neural correlates of the psychedelic state as determined by fMRI studies with psilocybin», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (2012), pp. 2138-2143.

Carhart-Harris, R. L., Muthukumaraswamy, S., Roseman, L., Kaelen, M., Droog, W., Murphy, K., Tagliazucchi, E., Schenberg, E. E., Nest, T., Orban, C. et al., «Neural correlates of the LSD experience revealed by multimodal neuroimaging», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (2016b), pp. 4853-4858.

Carrigan, M. A., Uryasev, O., Frye, C. B., Eckman, B. L., Myers, C. R., Hurley, T. D., Benner, S. A., «Hominids adapted to metabolize ethanol long before human-directed fermentation», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (2015), pp. 458-463.

Casadevall, A., «Fungi and the rise of mammals», *Pathogens*, 8 (2012), e1002808.

Casadevall, A., Cordero, R. J., Bryan, R., Nosanchuk, J., Dadachova, E., «Melanin, radiation, and energy transduction in fungi», *Microbiology Spectrum*, 5 (2017), FUNK-0037-2016. Casadevall, A.,

Kontoyiannis, D. P., Robert, V., «On the emergence of *Candida auris*: climate change, azoles, swamps and birds», *mBio*, 10 (2019), e01397-19.

Ceccarelli, N., Curadi, M., Martelloni, L., Sbrana, C., Picciarelli, P., Giovannetti, M., «Mycorrhizal colonization impacts on phenolic content and antioxidant properties of artichoke leaves and flower heads two years after field transplant», *Plant and Soil*, 335 (2010), pp. 311-323.

Cepelewicz, J., «Bacterial Complexity Revises Ideas about "Which Came First?"», *Quanta* (2019), www.quantamagazine.org/bacterial-organelles-revise-ideas-about-which-came-first-20190612/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Cerdá-Olmedo, E., «*Phycomyces* and the biology of light and color», *FEMS Microbiology Reviews*, 25 (2001), pp. 503-512.

Cernava, T., Aschenbrenner, I., Soh, J., Sensen, C. W., Grube, M., Berg, G., «Plasticity of a holobiont: desiccation induces fasting-like metabolism within the lichen microbiota», *SME Journal*, 13 (2019), pp. 547-556.

Chen, J., Blume, H., Beyer, L., «Weathering of rocks induced by lichen colonization – a review», *Catena*, 39 (2000), pp. 121-146.

Chen, L., Swenson, N. G., Ji, N., Mi, X., Ren, H., Guo, L., Ma, K., «Differential soil fungus accumulation and density dependence of trees in a subtropical forest», *Science*, 366 (2019), pp. 124-128.

Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., Reinhardt, D., «Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi – from ecology to application», *Frontiers in Plant Science*, 9 (2018), 1270.

Chialva, M., Di Fossalunga, A., Daghino, S., Ghignone, S., Bagnaresi, P., Chiapello, M., Novero, M., Spadaro, D., Perotto, S., Bonfante, P., «Native soils with their microbiotas elicit a state of alert in tomato plants», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1296-1308.

Chrisafis, A., «French truffle farmer shoots man he feared was trying to steal "black diamonds"», *Guardian* (2010), www.theguardian.com/world/2010/dec/22/french-truffle-farmer-shoots-trespasser [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Christakis, N. A., Fowler, J. H., *Connected: The Surprising Power of Our Social Networks and How They Shape Our Lives* (Londres, HarperPress, 2009).

Chu, C., Murdock, M. H., Jing, D., Won, T. H., Chung, H., Kressel, A. M., Tsaava, T., Addorisio, M. E., Putzel, G. G., Zhou, L. et al., «The microbiota regulate neuronal function and fear extinction learning», *Nature*, 574 (2019), pp. 543-548.

Chung, T.-Y., Sun, P.-F., Kuo, J.-I., Lee, Y.-I., Lin, C.-C., Chou, J.-Y., «Zombie ant heads are oriented relative to solar cues», *Fungal Ecology*, 25 (2017), pp. 22-28.

Cixous, H. *The Book of Promethea* (Lincoln, University of Nebraska Press, 1991).

Claus, R., Hoppen, H., Karg, H., «The secret of truffles: A steroidal pheromone?» *Experientia*, 37 (1981), pp. 1178-1179.

Clay, K. «Fungal endophytes of grasses: a defensive mutualism between plants and fungi», *Ecology*, 69 (1988), pp. 10-16.

Clemmensen, K., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R., Wardle, D., Lindahl, B., «Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest», *Science*, 339 (2013), pp. 1615-1618.

Cockell, C. S., «The interplanetary exchange of photosynthesis», *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 38 (2008), pp. 87-104.

Cohen, R., Jan, Y., Matricon, J., Dellbrück, M., «Avoidance response, house response, and wind responses of the sporangiophore of *Phycomyces*», *Journal of General Physiology*, 66 (1975), pp. 67-95.

Collier, F. A., Bidartondo, M. I., «Waiting for fungi: the ectomycorrhizal invasion of lowland heathlands», *Journal of Ecology*, 97 (2009), pp. 950-963.

Collinge, A., Trinci, A., «Hyphal tips of wild-type and spreading colonial mutants of *Neurospora crassa*», *Archive of Microbiology*, 99 (1974), pp. 353-368.

Cooke, M., *Fungi: Their Nature and Uses* (Nueva York, D. Appleton & Company, 1875).

Cooley, J. R., Marshall, D. C., Hill, K. B. R., «A specialized fungal parasite *(Massospora cicadina)* hijacks

the sexual signals of periodical cicadas (Hemiptera: Cicadidae: Magicicada)», *Scientific Reports*, 8 (2018), 1432.
Copetta, A., Bardi, L., Bertolone, E., Berta, G., «Fruit production and quality of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) are affected by green compost and arbuscular mycorrhizal fungi», *Plant Biosystems*, 145 (2011), pp. 106-115.
Copetta, A., Lingua, G., Berta, G., «Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs, and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. Genovese», *Mycorrhiza*, 16 (2006), pp. 485-494.
Corbin, A., *The Foul and the Fragrant: Odor and the French Social Imagination* (Leamington Spa, Berg, 1986).
Cordero, R. J., «Melanin for space travel radioprotection», *Environmental Microbiology,* 19 (2017), pp. 2529-2532.
Corrales, A., Mangan, S. A., Turner, B. L., Dalling, J. W., «An ectomycorrhizal nitrogen economy facilitates monodominance in a neotropical forest», *Ecology Letters*, 19 (2016), pp. 383-392.
Corrochano, L. M., Galland, P., «Photomorphogenesis and Gravitropism in Fungi», en J. Wendland ed., *Growth, Differentiation, and Sexuality* (Springer International Publishing, 2016), pp. 235-266.
Cosme, M., Fernández, I., Van der Heijden, M. G., Pieterse, C., «Non-mycorrhizal plants: the exceptions that prove the rule», *Trends in Plant Science*, 23 (2018), pp. 577-587.
Costello, E. K., Lauber, C. L., Hamady, M., Fierer, N., Gordon, J. I., Knight, R., «Bacterial community variation in human body habitats across space and time», *Science*, 326 (2009), pp. 1694-1697.
Cottin, H., Kotler, J., Billi, D., Cockell, C., Demets, R., Ehrenfreund, P., Elsaesser, A., d'Hendecourt, L., Van Loon, J. J., Martins, Z. et al., «Space as a tool for astrobiology: review and recommendations for experimentations in earth orbit and beyond», *Space Science Reviews*, 209 (2017) pp. 83-181.
Coyle, M. C., Elya, C. N., Bronski, M. J., Eisen, M. B., «Entomophthovirus: An insect-derived iflavirus that infects a behavior manipulating fungal pathogen of dipterans», *bioRxiv* (2018), 371526.
Craig, M. E., Turner, B. L., Liang, C., Clay, K., Johnson, D. J., Phillips, R. P., «Tree mycorrhizal type predicts within-site variability in the storage and distribution of soil organic matter», *Global Change Biology*, 24 (2018), pp. 3317-3330.
Crowther, T., Glick, H., Covey, K., Bettigole, C., Maynard, D., Thomas, S., Smith, J., Hintler, G., Duguid, M., Amatulli, G. et al., «Mapping tree density at a global scale», *Nature*, 525 (2015), pp. 201-268.
Currie, C. R., Poulsen, M., Mendenhall, J., Boomsma, J. J., Billen, J., «Coevolved crypts and exocrine glands support mutualistic bacteria in fungus-growing ants», *Science*, 311 (2006), pp. 81-83.
Currie, C. R., Scott, J. A., Summerbell, R. C., Malloch, D., «Fungus-growing ants use antibiotic-producing bacteria to control garden parasites», *Nature*, 398 (1999), pp. 701-704.
Dadachova, E., Casadevall, A., «Ionizing radiation: how fungi cope, adapt and exploit with the help of melanin», *Current Opinion in Microbiology*, 11 (2008), pp. 525-531.
Dance, A., «Inner workings: the mysterious parentage of the coveted black truffle», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (2018), pp. 10188-10190.
Darwin, C., Darwin, F., *The Power of Movement in Plants* (Londres, John Murray, 1880).
Davis, J., Aguirre, L., Barber, N., Stevenson, P., Adler, L., «From plant fungi to bee parasites: mycorrhizae and soil nutrients shape floral chemistry and bee pathogens», *Ecology*, 100 (2019), e02801.
Davis, W., *One River: Explorations and Discoveries in the Amazon Rainforest* (Nueva York, Simon & Schuster, 1996).
Dawkins, R., *The Extended Phenotype* (Oxford, Oxford University Press, 1982).
Dawkins, R., «Extended phenotype – but not too extended. A reply to Laland, Turner and Jablonka», *Biology and Philosophy*, 19 (2004), pp. 377-396.
De Bekker, C., Quevillon, L. E., Smith, P. B., Fleming, K. R., Ghosh, D., Patterson A. D., Hughes, D. P., «Species-specific ant brain manipulation by a specialized fungal parasite», *BMC Evolutionary Biology*, 14 (2014), p. 166.
De Gonzalo, G., Colpa, D. I., Habib, M., Fraaije, M. W., «Bacterial enzymes involved in lignin

degradation», *Journal of Biotechnology*, 236 (2016), pp. 110-119.
De Jong, E., Field, J. A., Spinnler, H. E., Wijnberg, J. B., De Bont, J. A., «Significant biogenesis of chlorinated aromatics by fungi in natural environments», *Applied and Environmental Microbiology*, 60 (1994) pp. 264-270.
De la Fuente-Nunez, C., Meneguetti, B., Franco, O., Lu, T. K., «Neuromicrobiology: how microbes influence the brain», *ACS Chemical Neuroscience*, 9 (2017), pp. 141-150.
De la Torre, R., Miller, A., Cubero, B., Martín-Cerezo, L. M., Raguse, M., Meeßen, J., «The effect of high-dose ionizing radiation on the astrobiological model lichen *Circinaria gyrosa*», *Astrobiology*, 17 (2017), pp. 145-153.
De la Torre Noetzel, R., Miller, A. Z., De la Rosa, J. M., Pacelli, C., Onofri, S., Sancho, L., Cubero, B., Lorek, A., Wolter, D., De Vera, J. P., «Cellular responses of the lichen *Circinaria gyrosa* in Mars-like conditions», *Frontiers in Microbiology*, 9 (2018), 308.
De los Ríos, A., Sancho, L., Grube, M., Wierzchos, J., Ascaso, C., «Endolithic growth of two *Lecidea* lichens in granite from continental Antarctica detected by molecular and microscopy techniques», *New Phytologist*, 165 (2005), pp. 181-190.
De Vera, J. P., Alawi, M., Backhaus, T., Baqué, M., Billi, D., Böttger, U., Berger, T., Bohmeier, M., Cockell, C., Demets, R. et al., «Limits of life and the habitability of Mars: the ESA space experiment BIOMEX on the ISS», *Astrobiology*, 19 (2019), pp. 145-157.
De Vries, F. T., Thébault, E., Liiri, M., Birkhofer, K., Tsiafouli, M. A., Bjørnlund, L., Jørgensen, H., Brady, M., Christensen, S., De Ruiter, P. C. et al., «Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (2013), pp. 14296-14301.
De Waal, F. B. M., «Anthropomorphism and anthropodenial», *Philosophical Topics*,27(1999), pp. 255-280.
Delaux, P.-M., Radhakrishnan, G. V., Jayaraman, D., Cheema, J., Malbreil, M., Volkening, J. D., Sekimoto, H., Nishiyama, T., Melkonian, M., Pokorny, L. et al., «Algal ancestor of land plants was preadapted for symbiosis», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (2015), pp. 13390-13395.
Delavaux, C. S., Smith-Ramesh, L., Kuebbing, S. E., «Beyond nutrients: a metaanalysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils», *Ecology*, 98 (2017), pp. 2111-2119.
Deleuze, G., Guattari, F., *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia* (Mineápolis, University of Minnesota Press, 2005).
Delwiche, C., Cooper, E., «The evolutionary origin of a terrestrial flora», *Current Biology*, 25 (2015), pp. R899-R910.
Deng, Y., Qu, Z., Naqvi, N. I., «Twilight, a novel circadian-regulated gene, integrates phototropism with nutrient and redox homeostasis during fungal development», *PLOS Pathogens*, 11 (2015), e1004972.
Deveau, A., Bonito, G., Uehling, J., Paoletti, M., Becker, M., Bindschedler, S., Hacquard, S., Hervé, V., Labbé, J., Lastovetsky, O. et al., «Bacterial-fungal interactions: ecology, mechanisms and challenges», *FEMS Microbiology Reviews*, 42 (2018), pp. 335-352.
Di Fossalunga, A., Lipuma, J., Venice, F., Dupont, L., Bonfante, P., «The endobacterium of an arbuscular mycorrhizal fungus modulates the expression of its toxin-antitoxin systems during the life cycle of its host», *ISME Journal*, 11 (2017), pp. 2394-2398.
Diamant, L., *Chaining the Hudson: The Fight for the River in the American Revolution* (Nueva York, Fordham University Press, 2004).
Ditengou, F. A., Müller, A., Rosenkranz, M., Felten, J., Lasok, H., Van Doorn, M., Legué, V., Palme, K., Schnitzler, J.-P., Polle, A., «Volatile signalling by sesquiterpenes from ectomycorrhizal fungi reprogrammes root architecture», *Nature Communications*, 6 (2015), 6279.
Dixon, L. S., «Bosch's *St Anthony Triptych* – An apothecary's apotheosis», *Art Journal*, 44 (1984), pp. 119-131.
Donoghue, P. C., Antcliffe, J. B., «Early life: origins of multicellularity», *Nature*, 466 (2010), p. 41.
Doolittle, F. W., Booth, A., «It's the song, not the singer: an exploration of holobiosis and evolutionary theory», *Biology & Philosophy*, 32 (2017), pp. 5-24.

Dressaire, E., Yamada, L., Song, B., Roper, M., «Mushrooms use convectively created airflows to disperse their spores», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (2016), pp. 2833-2838.

Dudley, R., *The Drunken Monkey: Why We Drink and Abuse Alcohol* (Berkeley, University of California Press, 2014).

Dugan, F. M., *Fungi in the Ancient World* (St Paul, Minesota, American Phytopathological Society, 2008).

Dugan, F. M., *Conspectus of World Ethnomycology* (St Paul, Minesota, American Phytopathological Society, 2011).

Dunn, R., «A Sip for the Ancestors», *Scientific American* (2012), blogs.scientificamerican.com/guest-blog/a-sip-for-the-ancestors-the-true-story-of-civilizations-stumbling-debt-to-beer-and-fungus/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Dupré, J., Nicholson, D. J., «A manifesto for a processual biology», en. J. Dupré y D. J. Nicholson eds, *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology* (Oxford, Oxford University Press, 2018), pp. 3-48.

Dyke, E., *Psychedelic Psychiatry: LSD from Clinic to Campus* (Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University Press, 2008).

Eason, W., Newman, E., Chuba, P., «Specificity of interplant cycling of phosphorus: the role of mycorrhizas», *Plant and Soil*, 137 (1991), pp. 267-274.

Elser, J. y Bennett, E., «A broken biogeochemical cycle», *Nature* (2011), www.nature.com/articles/478029a [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Eltz, T., Zimmermann, Y., Haftmann, J., Twele, R., Francke, W., Quezada-Euan, J. J. G., Lunau, K., «Enfleurage, lipid recycling and the origin of perfume collection in orchid bees», *Proceedings of the Royal Society B*, 274 (2007), pp. 2843-2848.

Eme, L., Spang, A., Lombard, J., Stairs, C. W., Ettema, T. J. G., «Archaea and the origin of eukaryotes», *Nature Reviews Microbiology*, 15 (2017), pp. 711-723.

Engelthaler, D. M., Casadevall, A., «On the Emergence of *Cryptococcus gattii* in the Pacific Northwest: ballast tanks, tsunamis, and black swans», *mBio*, 10 (2019), e02193-19.

Ensminger, P. A., *Life under the Sun* (New Haven, Connecticut, Yale Scholarship Online, 2001).

Epstein, S., «The construction of lay expertise: AIDS activism and the forging of credibility in the reform of clinical trials», *Science, Technology, Human Values*, 20 (1995), pp. 408-437.

Erens, H., Boudin, M., Mees, F., Mujinya, B., Baert, G., Strydonck, M., Boeckx, P., Ranst, E., «The age of large termite mounds – radiocarbon dating of *Macrotermes falciger* mounds of the Miombo woodland of Katanga, DR Congo», *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 435 (2015), pp. 265-271.

Espinosa-Valdemar, R., Turpin-Marion, S., Delfín-Alcalá, I., Vázquez-Morillas, A., «Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*», *Waste Management*, 31 (2011), pp. 1683-1688.

Fairhead, J., Leach, M., «Termites, Society and Ecology: Perspectives from West Africa», en E. Motte-Florac y J. Thomas eds., *Insects in Oral Literature and Traditions* (Lovaina, Bélgica, Peeters, 2003).

Fairhead, J., Scoones, I., «Local knowledge and the social shaping of soil investments: critical perspectives on the assessment of soil degradation in Africa», *Land Use Policy*, 22 (2005), pp. 33-41.

Fairhead, J. R., «Termites, mud daubers and their earths: a multispecies approach to fertility and power in West Africa», *Conservation and Society*, 14 (2016), pp. 359-367.

Farahany, N. A., Greely, H. T., Hyman, S., Koch, C., Grady, C., Pas¸ca, S. P., Sestan, N., Arlotta, P., Bernat, J. L., Ting, J. et al., «The ethics of experimenting with human brain tissue», *Nature*, 556 (2018), pp. 429-432.

Ferreira, B., «There's growing evidence that the universe is connected by giant structures», *Vice* (2019), www.vice.com/en_us/article/zmj7pw/theres-growing-evidence-thatthe-universe-is-connected-by-giant-structures [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Fellbaum, C. R., Mensah, J. A., Cloos, A. J., Strahan, G. E., Pfeffer, P. E., Kiers, T. E., Bücking, H., «Fungal nutrient allocation in common mycorrhizal networks is regulated by the carbon source strength of individual host plants», *New Phytologist*, 203 (2014) pp. 646-656.

Ferguson, B. A., Dreisbach, T., Parks, C., Filip, G., Schmitt, C., «Coarse-scale population structure of pathogenic *Armillaria* species in a mixed-conifer forest in the Blue Mountains of northeast Oregon», *Canadian Journal of Forest Research*, 33 (2003), pp. 612-623.

Fernandez, C. W., Nguyen, N. H., Stefanski, A., Han, Y., Hobbie, S. E., Montgomery, R. A., Reich, P. B., Kennedy, P. G., «Ectomycorrhizal fungal response to warming is linked to poor host performance at the boreal-temperate ecotone», *Global Change Biology*, 23 (2017), pp. 1598-1609.

Field, K. J., Cameron, D. D., Leake, J. R., Tille, S., Bidartondo, M. I., Beerling, D. J., «Contrasting arbuscular mycorrhizal responses of vascular and non-vascular plants to a simulated Palaeozoic CO2 decline», *Nature Communications*, 3 (2012), 835.

Field, K. J., Leake, J. R., Tille, S., Allinson, K. E., Rimington, W. R., Bidartondo, M. I., Beerling, D. J., Cameron, D. D., «From mycoheterotrophy to mutualism: mycorrhizal specificity and functioning in *Ophioglossum vulgatum* sporophytes», *New Phytologist*, 205 (2015), pp. 1492-1502.

Fisher, M. C., Hawkins, N. J., Sanglard, D., Gurr, S. J., «Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security», *Science*, 360 (2018), pp. 739-742.

Fisher, M. C., Henk, D. A., Briggs, C. J., Brownstein, J. S., Madoff, L. C., McCraw, S. L., Gurr, S. J., «Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health», *Nature*, 484 (2012), pp. 186-194.

Floudas, D., Binder, M., Riley, R., Barry, K., Blanchette, R. A., Henrissat, B., Martínez, A. T., Otillar, R., Spatafora, J. W., Yadav, J. S. et al., «The Paleozoic origin of enzymatic lignin decomposition reconstructed from 31 fungal genomes», *Science*, 336 (2012), pp. 1715-1719.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, S. F., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K. et al., «Global consequences of land use», *Science*, 309 (2005), pp. 570-574.

Francis, R., Read, D. J., «Direct transfer of carbon between plants connected by vesicular-arbuscular mycorrhizal mycelium», *Nature*, 307 (1984), pp. 53-56.

Frank, A. B., «On the nutritional dependence of certain trees on root symbiosis with belowground fungi» (traducción al inglés del artículo de A. B. Frank de 1885), *Mycorrhiza*, 15 (2005), pp. 267-275.

Fredericksen, M. A., Zhang, Y., Hazen, M. L., Loreto, R. G., Mangold, C. A., Chen, D. Z., Hughes, D. P., «Three-dimensional visualization and a deep-learning model reveal complex fungal parasite networks in behaviorally manipulated ants», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (2017), pp. 12590-12595.

Fricker, M. D., Heaton, L. L., Jones, N. S., Boddy, L., «The mycelium as a network», *Microbiology Spectrum*, 5 (2017), FUNK-0033-2017.

Fricker, M. D., Boddy, L., Bebber, D. P., «Network Organisation of Mycelial Fungi», en R. J. Howard y N. A. R. Gow eds., *Biology of the Fungal Cell* (Springer International Publishing, 2007a), pp. 309-330.

Fricker, M. D., Lee, J., Bebber, D., Tlalka, M., Hynes, J., Darrah, P., Watkinson, S., Boddy, L., «Imaging complex nutrient dynamics in mycelial networks», *Journal of Microscopy*, 231 (2008), pp. 317-331.

Fricker, M. D., Lee, J., Tlalka, M., Bebber, D., Tagaki, S., Watkinson, S. C., Darrah, P. R., «Fourier-based spatial mapping of oscillatory phenomena in fungi», *Fungal Genetics and Biology*, 44 (2007b), pp. 1077-1084.

Fries, N., «Untersuchungen über Sporenkeimung und Mycelentwicklung bodenbewohneneder Hymenomyceten», *Symbolae Botanicae Upsaliensis*, 6 (1943), pp. 633-664.

Fritts, R., «A new pesticide is all the buzz», *Ars Technica* (2019), arstechnica.com/science/2019/10/now-available-in-the-us-a-pesticide-delivered-by-bees/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Fröhlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D. A., Després, V. R., Pöschl, U., «High diversity of fungi in air particulate matter», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (2009), pp. 12814-12819.

Fukusawa Y., Savoury M., Boddy L., «Ecological memory and relocation decisions in fungal mycelial networks: responses to quantity and location of new resources», *ISME Journal* (2019) 10.1038/s41396-018-0189-7.

Galland, P., «The sporangiophore of *Phycomyces blakesleeanus*: a tool to investigate fungal gravireception and graviresponses», *Plant Biology*, 16 (2014), pp. 58-68.

Gavito, M. E., Jakobsen, I., Mikkelsen, T. N., Mora, F., «Direct evidence for modulation of photosynthesis

by an arbuscular mycorrhiza-induced carbon sink strength», *New Phytologist*, 223 (2019), pp. 896-907.
Geml, J., Wagner, M. R., «Out of sight, but no longer out of mind – towards an increased recognition of the role of soil microbes in plant speciation», *New Phytologist*, 217 (2018), pp. 965-967.
Giauque, H., Hawkes, C. V., «Climate affects symbiotic fungal endophyte diversity and performance», *American Journal of Botany*, 100 (2013), pp. 1435-1444.
Gilbert, C. D., Sigman, M., «Brain states: top-down influences in sensory processing», *Neuron*, 54 (2007), pp. 677-696.
Gilbert, J. A., Lynch, S. V., «Community ecology as a framework for human microbiome research», *Nature Medicine*, 25 (2019), pp. 884-889.
Gilbert, S. F., Sapp, J., Tauber, A. I., «A symbiotic view of life: we have never been individuals», *Quarterly Review of Biology*, 87 (2012), pp. 325-341.
Giovannetti, M., Avio, L., Fortuna, P., Pellegrino, E., Sbrana, C., Strani, P., «At the root of the Wood Wide Web», *Plant Signaling & Behavior*, 1 (2006), pp. 1-5.
Giovannetti, M., Avio, L., Sbrana, C., «Functional Significance of Anastomosis in Arbuscular Mycorrhizal Networks», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Publishing, 2015), pp. 41-67.
Giovannetti, M., Sbrana, C., Avio, L., Strani, P., «Patterns of below-ground plant interconnections established by means of arbuscular mycorrhizal networks», *New Phytologist*, 164 (2004), pp. 175-181.
Gluck-Thaler, E., Slot, J. C., «Dimensions of horizontal gene transfer in eukaryotic microbial pathogens», *PLOS Pathogens*, 11 (2015), e1005156.
Godfray, C. H., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., Toulmin, C., «Food security: the challenge of feeding 9 billion people», *Science*, 327 (2010), pp. 812-818.
Godfrey-Smith, P., *Other Minds: The Octopus and the Evolution of Intelligent Life* (Londres, William Collins, 2017).
Goffeau, A., Barrell, B., Bussey, H., Davis, R., Dujon, B., Feldmann, H., Galibert, F., Hoheisel, J., Jacq, C., Johnston, M. et al., «Life with 6000 genes», *Science*, 274 (1996), pp. 546-567.
Gogarten, P. J., Townsend, J. P., «Horizontal gene transfer, genome innovation and evolution», *Nature Reviews Microbiology*, 3 (2005), pp. 679-687.
Gond, S. K., Kharwar, R. N., White, J. F., «Will fungi be the new source of the blockbuster drug Taxol?» *Fungal Biology Reviews*, 28 (2014), pp. 77-84.
Gontier, N., «Reticulate Evolution Everywhere», en N. Gontier ed., *Reticulate Evolution*(Springer International Publishing, 2015a).
Gontier, N., «Historical and Epistemological Perspectives on What Horizontal Gene Transfer Mechanisms Contribute to Our Understanding of Evolution», en N. Gontier ed., *Reticulate Evolution* (Springer International Publishing, 2015b).
Gordon, J., Knowlton, N., Relman, D. A., Rohwer, F., Youle, M., «Superorganisms and holobionts», *Microbe*, 8 (2013), pp. 152-153.
Goryachev, A. B., Lichius, A., Wright, G. D., Read, N. D., «Excitable behavior can explain the “ping-pong” mode of communication between cells using the same chemoattractant», *BioEssays*, 34 (2012), pp. 259-266.
Gorzelak, M. A., Asay, A. K., Pickles, B. J., Simard, S. W., «Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities», *AoB PLANTS*, 7 (2015), plv050.
Gott, J. R., *The Cosmic Web: Mysterious Architecture of the Universe* (Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 2016).
Govoni, F., Orrù, E., Bonafede, A., Iacobelli, M., Paladino, R., Vazza, F., Murgia, M., Vacca, V., Giovannini, G., Feretti, L., et al., «A radio ridge connecting two galaxy clusters in a filament of the cosmic web», *Science*, 364 (2019), pp. 981-984.
Gow, N. A. R., Morris, B. M., «The electric fungus», *Botanical Journal of Scotland*, 47 (2009), pp. 263-

277.
Goward, T. «Here for a long time, not a good time.», *Nature Canada*, 24: 9 (1995), www.waysofenlichenment.net/public/pdfs/Goward_1995_Here_for_a_good_time_not_a_long_time.pd [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Goward, T., «Twelve readings on the lichen Thallus VII – species», *Evansia*, 26 (2009a), pp. 153-162, www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay7 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Goward, T., «Twelve readings on the lichen Thallus IV – re-emergence», *Evansia*, 26 (2009b), pp. 1-6, www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay4 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Goward, T., «Twelve readings on the lichen Thallus V – conversational», *Evansia*, 26 (2009c), pp. 31-37. www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay5 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Goward, T., «Twelve readings on the lichen Thallus VIII – theoretical», *Evansia*, 27 (2010), pp. 2-10, www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay8 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Gregory, P. H., «Fairy rings; free and tethered», *Bulletin of the British Mycological Society*, 16 (1982), pp. 161-163.
Griffiths, D., «Queer theory for lichens», *UnderCurrents*, 19 (2015), pp. 36-45.
Griffiths, R., Johnson, M., Carducci, M., Umbricht, A., Richards, W., Richards, B., Cosimano, M., Klinedinst, M., «Psilocybin produces substantial and sustained decreases in depression and anxiety in patients with life-threatening cancer: a randomized double-blind trial», *Journal of Psychopharmacology*, 30 (2016), pp. 1181-1197.
Griffiths, R., Richards, W., Johnson, M., McCann, U., Jess, R., «Mystical-type experiences occasioned by psilocybin mediate the attribution of personal meaning and spiritual significance 14 months later», *Journal of Psychopharmacology*, 22 (2008), pp. 621-632.
Grman, E., «Plant species differ in their ability to reduce allocation to non-beneficial arbuscular mycorrhizal fungi», *Ecology*, 93 (2012), pp. 711-718.
Grube, M., Cernava, T., Soh, J., Fuchs, S., Aschenbrenner, I., Lassek, C., Wegner, U., Becher, D., Riedel, K., Sensen, C. W. et al., «Exploring functional contexts of symbiotic sustain within lichen-associated bacteria by comparative omics», *ISME Journal*, 9 (2015), pp. 412-424.
Gupta, M., Prasad, A., Ram, M., Kumar, S., «Effect of the vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) fungus *Glomus fasciculatum* on the essential oil yield related characters and nutrient acquisition in the crops of different cultivars of menthol mint *(Mentha arvensis)* under field conditions», *Bioresource Technology*, 81 (2002), pp. 77-79.
Guzmán, G., Allen, J. W., Gartz, J., «A worldwide geographical distribution of the neurotropic fungi, an analysis and discussion», *Annali del Museo Civico di Rovereto: Sezione Archeologia, Storia, Scienze Naturali*, 14 (1998), pp. 189-280, www.museocivico.rovereto.tn.it/UploadDocs/104_art09-Guzman%20&%20C.pdf [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Hague, T., Florini, M., Andrews, P., «Preliminary *in vitro* functional evidence for reflex responses to noxious stimuli in the arms of *Octopus vulgaris*», *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 447 (2013), pp. 100-105.
Hall, I. R., Brown, G. T., Zambonelli, A., *Taming the Truffle* (Portland, Oregón, Timber Press, 2007).
Hamden, E., «Observing the cosmic web», *Science*, 366 (2019), pp. 31-32.
Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., Athanassiou, A., «Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties», *Scientific Reports*, 7 (2017), 41292.
Hanson, K. L., Nicolau, D. V., Filipponi, L., Wang, L., Lee, A. P., Nicolau, D. V., «Fungi use efficient algorithms for the exploration of microfluidic networks», *Small*, 2 (2006), pp. 1212-1220.
Haraway, D. J., *Crystals, Fabrics, and Fields* (Berkeley, California, North Atlantic Books, 2004).
Haraway, D. J., *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene* (Durham, Carolina del Norte, Duke University Press, 2016).
Harms, H., Schlosser, D., Wick, L. Y., «Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals», *Nature Reviews Microbiology*, 9 (2011), pp. 177-192.

Harold, F. M., Kropf, D. L., Caldwell, J. H., «Why do fungi drive electric currents through themselves?», *Experimental Mycology*, 9 (1985), pp. 183-186.

Hart, M. M., Antunes, P. M., Chaudhary, V., Abbott, L. K., «Fungal inoculants in the field: is the reward greater than the risk?» *Functional Ecology*, 32 (2018), 126-135.

Hastings, A., Abbott, K. C., Cuddington, K., Franci, T., Gellner, G., Lai, Y.-C., Morozov, A., Petrovskii, S., Scranton, K., Zeeman, M., «Transient phenomena in ecology», *Science, 361 (2018), eaat6412*.

Hawksworth, D., «The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revisited», *Mycological Research*, 12 (2001), pp. 1422-1432.

Hawksworth, D., «Mycology: A Neglected Megascience», en M. Rai y P. D. Bridge eds., *Applied Mycology* (Oxford, CABI, 2009), pp. 1-16.

Hawksworth, D. L., Lücking, R., «Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species», *Microbiology Spectrum*, 5 (2017), FUNK-00522016.

Heads, S. W., Miller, A. N., Crane, L. J., Thomas, J. M., Ruffatto, D. M., Methven, A. S., Raudabaugh, D. B., Wang, Y., «The oldest fossil mushroom», *PLOS ONE*, 12 (2017), e0178327.

Hedger, J., «Fungi in the tropical forest canopy», *Mycologist*, 4 (1990), pp. 200-202.

Held, M., Edwards, C., Nicolau, D., «Fungal intelligence; or on the behaviour of micro-organisms in confined micro-environments», *Journal of Physics: Conference Series*, 178 (2009), 012005.

Held, M., Edwards, C., Nicolau, D. V., «Probing the growth dynamics of *Neurospora crassa* with microfluidic structures», *Fungal Biology*, 115 (2011), pp. 493-505.

Held, M., Kašpar, O., Edwards, C., Nicolau, D. V., «Intracellular mechanisms of fungal space searching in microenvironments», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (2019), pp. 13543-13552.

Held, M., Lee, A. P., Edwards, C., Nicolau, D. V., «Microfluidics structures for probing the dynamic behaviour of filamentous fungi», *Microelectronic Engineering*, 87 (2010), pp. 786-789.

Helgason, T., Daniell, T., Husband, R., Fitter, A., Young, J., «Ploughing up the wood-wide web?», *Nature*, 394 (1998), p. 431.

Hendricks, P. S., «Awe: a putative mechanism underlying the effects of classic psychedelic-assisted psychotherapy», *International Review of Psychiatry*, 30 (2018), pp. 1-12.

Hibbett, D., Blanchette, R., Kenrick, P., Mills, B., «Climate, decay and the death of the coal forests», *Current Biology*, 26 (2016), pp. 563-567.

Hibbett, D., Gilbert, L., Donoghue, M., «Evolutionary instability of ectomycorrhizal symbioses in basidiomycetes», *Nature*, 407 (2000), pp. 506-508.

Hickey, P. C., Dou, H., Foshe, S., Roper, M., «Anti-jamming in a fungal transport network» (2016), arXiv:1601.06097v1 [physics.bio-ph].

Hickey, P. C., Jacobson, D., Read, N. D., Glass, L. N., «Live-cell imaging of vegetative hyphal fusion in *Neurospora crassa*», *Fungal Genetics and Biology*, 37 (2002), pp. 109-119.

Hillman, B., *Extra Hidden Life, among the Days* (Middletown, Connecticut, Wesleyan University Press, 2018).

Hiruma, K., Kobae, Y., Toju, H., «Beneficial associations between Brassicaceae plants and fungal endophytes under nutrient-limiting conditions: evolutionary origins and host-symbiont molecular mechanisms», *Current Opinion in Plant Biology*, 44 (2018), pp. 145-154.

Hittinger, C., «Endless rots most beautiful», *Science*, 336 (2012), pp. 1649-1650.

Hoch, H. C., Staples, R. C., Whitehead, B., Comeau, J., Wolf, E. D., «Signaling for growth orientation and cell differentiation by surface topography in *Uromyces*», *Science*, 235 (1987), pp. 1659-1662.

Hoeksema, J., «Experimentally Testing Effects of Mycorrhizal Networks on Plant – Plant Interactions and Distinguishing among Mechanisms», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Publishing, 2015), pp. 255-277.

Hoeksema, J. D., Chaudhary, V. B., Gehring, C. A., Johnson, N. C., Karst, J., Koide, R. T., Pringle, A., Zabinski, C., Bever, J. D., Moore, J. C. et al., «A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi», *Ecology Letters*, 13 (2010), pp. 394-407.

Hom, E. F., Murray, A. W., «Niche engineering demonstrates a latent capacity for fungal- algal

mutualism», *Science*, 345 (2014), pp. 94-98.
Honegger, R., «Simon Schwendener (1829-1919) and the dual hypothesis of lichens, *Bryologist, 103 (2000), pp. 307-313.*
Honegger, R., Edwards, D., Axe, L., «The earliest records of internally stratified cyano-bacterial and algal lichens from the Lower Devonian of the Welsh Borderland», *New Phytologist*, 197 (2012), pp. 264-275.
Honegger, R., Edwards, D., Axe, L., Strullu-Derrien, C., «Fertile *Prototaxites taiti*: a basal ascomycete with inoperculate, polysporous asci lacking croziers», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373 (2018), 20170146.
Hooks, K. B., Konsman, J., O'Malley, M. A., «Microbiota-gut-brain research: a critical ana- lysis», *Behavioral and Brain Sciences*, 42 (2018), e60.
Horie, M., Honda, T., Suzuki, Y., Kobayashi, Y., Daito, T., Oshida, T., Ikuta, K., Jern, P., Gojobori, T., Coffin, J. M. et al., «Endogenous non-retroviral RNA virus elements in mammalian genomes», *Nature*, 463 (2010), pp. 84-87.
Hortal, S., Plett, K., Plett, J., Cresswell, T., Johansen, M., Pendall, E., Anderson, I., «Role of plant-fungal nutrient trading and host control in determining the competitive suc- cess of ectomycorrhizal fungi», *ISME Journal*, 11 (2017), pp. 2666-2676.
Howard, A., *An Agricultural Testament* (Oxford, Oxford University Press, 1940), www.journeytoforever.org/farm_library/howardAT/ATtoc.html#contents [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Howard A., *Farming and Gardening for Health and Disease* (Londres, Faber & Faber, 1945), journeytoforever.org/farm_library/howardSH/SHtoc.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Howard, R., Ferrari, M., Roach, D., Money, N., «Penetration of hard substrates by a fungus employing enormous turgor pressures», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88 (1991), pp. 11281-11284.
Hoysted, G. A., Kowal, J., Jacob, A., Rimington, W. R., Duckett, J. G., Pressel, S., Orchard, S., Ryan, M. H., Field, K. J., Bidartondo, M. I., «A mycorrhizal revolution», *Current Opinion in Plant Biology*, 44 (2018), pp. 1-6.
Hsueh, Y.-P., Mahanti, P., Schroeder, F. C., Sternberg, P. W., «Nematode-trapping fungi eavesdrop on nematode pheromones», *Current Biology*, 23 (2013), pp. 83-86.
Huffnagle, G. B., Noverr, M. C., «The emerging world of the fungal microbiome», *Trends in Microbiology*, 21 (2013), pp. 334-341.
Hughes, D. P., «On the origins of parasite-extended phenotypes», *Integrative and Comparative Biology*, 54 (2014), pp. 210-217.
Hughes, D. P., Araújo, J., Loreto, R., Quevillon, L., De Bekker, C., Evans, H., «From so simple a beginning: the evolution of behavioural manipulation by fungi», *Advances in Genetics*, 94 (2016), pp. 437-469.
Hughes, D. P., «Pathways to understanding the extended phenotype of parasites in their hosts», *Journal of Experimental Biology*, 216 (2013), pp. 142-147.
Hughes, D. P., Wappler, T., Labandeira, C. C., «Ancient death-grip leaf scars reveal ant-fun- gal parasitism», *Biology Letters*, 7 (2011), pp. 67-70.
Humphrey, N., «The Social Function of Intellect», en P. Bateson y R. A. Hindle eds., *Growing Points in Ethology* (Cambridge, Cambridge University Press, 1976), pp. 303-317.
Hustak, C., Myers, N., «Involutionary momentum: affective ecologies and the sciences of plant/insect encounters», *Differences*, 23 (2012), pp. 74-118.
Hyde, K., Jones, E., Leano, E., Pointing, S., Poonyth, A., Vrijmoed, L., «Role of fungi in ma- rine ecosystems», *Biodiversity and Conservation*, 7 (1998), pp. 1147-1161.
Ingold, T., «Two Reflections on Ecological Knowledge», en G. Sanga y G. Ortall eds., *Nature Knowledge: Ethnoscience, Cognition, and Utility* (Oxford, Berghahn Books, 2003), pp. 301-311.

Islam, F., Ohga, S., «The response of fruit body formation on *Tricholoma matsutake in situ* condition by applying electric pulse stimulator», *ISRN Agronomy* (2012), pp. 1-6.

Jackson, S., Heath, I., «UV microirradiations elicit Ca2+-dependent apex-directed cy- to-plasmic contractions in hyphae», *Protoplasma*, 70 (1992), pp. 46-52.

Jacobs, L. F., Arter, J., Cook, A., Sulloway, F. J., «Olfactory orientation and navigation in humans», *PLOS ONE*, 10 (2015), e0129387.

Jacobs, R., *The Truffle Underground* (Nueva York, Clarkson Potter, 2019).

Jakobsen, I., Hammer, E., «Nutrient Dynamics in Arbuscular Mycorrhizal Networks», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Publishing, 2015), pp. 91-131.

James, W., *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature* (Centenary Edition) (Londres, Routledge, 2002).

Jedd, G., Pieuchot, L., «Multiple modes for gatekeeping at fungal cell-to-cell channels», *Molecular Microbiology*, 86 (2012), pp. 1291-1294.

Jenkins, B., Richards, T. A., «Symbiosis: wolf lichens harbour a choir of fungi», *Current Biology*, 29 (2019), R88-90.

Ji, B., Bever, J. D., «Plant preferential allocation and fungal reward decline with soil phos- phorus: implications for mycorrhizal mutualism», *Ecosphere*, 7 (2016), e01256.

Johnson, D., Gamow, R., «The avoidance response in *Phycomyces*», *Journal of General Physiology*, 57 (1971), pp. 41-49.

Johnson, M. W., Garcia-Romeu, A., Cosimano, M. P., Griffiths, R. R., «Pilot study of the 5-HT 2AR agonist psilocybin in the treatment of tobacco addiction», *Journal of Psychopharmacology*, 28 (2014), pp. 983-992.

Johnson, M. W., Garcia-Romeu, A., Griffiths, R. R., «Long-term follow-up of psilocybin-facilitated smoking cessation», *American Journal of Drug and Alcohol Abuse*, 43 (2015), pp. 55-60.

Johnson, M. W., Garcia-Romeu, A., Johnson, P. S., Griffiths, R. R., «An online survey of tobacco smoking cessation associated with naturalistic psychedelic use», *Journal of Psychopharmacology*, 31 (2017), pp. 841-850.

Johnson, N. C., Angelard, C., Sanders, I. R., Kiers, T. E., «Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change», *Ecology Letters*, 16 (2013), pp. 140-153.

Jolivet, E., L'Haridon, S., Corre, E., Forterre, P., Prieur, D., «*Thermococcus gammatolerans* sp. nov., a hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent that resists ionizing radiation», *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53 (2003), pp. 847-851.

Jones, M. P., Lawrie, A. C., Huynh, T. T., Morrison, P. D., Mautner, A., Bismarck, A., John, S., «Agricultural by-product suitability for the production of chitinous composites and nanofibers», *Process Biochemistry*, 80 (2019), pp, 95-102.

Jönsson, K. I., Rabbow, E., Schill, R. O., Harms-Ringdahl, M., Rettberg, P., «Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit», *Current Biology*, 18 (2008), R729-31.

Jönsson, K. I., Wojcik, A., «Tolerance to X-rays and heavy ions (Fe, He) in the tardigrade *Richtersius coronifer* and the bdelloid rotifer *Mniobia russeola*», *Astrobiology*, 17 (2017), pp. 163-167.

Kaminsky, L. M., Trexler, R. V., Malik, R. J., Hockett, K. L., Bell, T. H., «The inherent conflicts in developing soil microbial inoculants», *Trends in Biotechnology*, 37 (2018), pp. 140-151.

Kammerer, L., Hiersche, L., Wirth, E., «Uptake of radiocaesium by different species of mushrooms», *Journal of Environmental Radioactivity*, 23 (1994), pp. 135-150.

Karst, J., Erbilgin, N., Pec, G. J., Cigan, P. W., Najar, A., Simard, S. W., Cahill, J. F., «Ectomycorrhizal fungi mediate indirect effects of a bark beetle outbreak on secondary chemistry and establishment of pine seedlings», *New Phytologist*, 208 (2015), pp. 904-914.

Katz, S. E., *Wild Fermentation* (White River Junction, Vermont, Chelsea Green Publishing Company, 2003).

Kavaler, L., *Mushrooms, Moulds and Miracles: The Strange Realm of Fungi* (Londres, Harrap, 1967).

Keijzer, F. A., «Evolutionary convergence and biologically embodied cognition», *Journal of the Royal*

*Society Interface Focus*, 7 (2017), 20160123.
Keller, E.F., *A Feeling for the Organism* (Nueva York, Times Books, 1984).
Kelly, J. R., Borre, Y., O'Brien, C., Patterson, E., El Aidy, S., Deane, J., Kennedy, P. J., Beers, S., Scott, K., Moloney, G. et al., «Transferring the blues: depression-associated gut microbiota induces neurobehavioural changes in the rat», *Journal of Psychiatric Research*, 82 (2016), pp. 109-118.
Kelty, C., «Outlaws, hackers, Victorian amateurs: diagnosing public participation in the life sciences today», *Journal of Science Communication*, 9 (2010).
Kendi, I. X., *Stamped from the Beginning* (Nueva York, Nation Books, 2017).
Kennedy, P. G., Walker, J. K. M., Bogar, L. M., «Interspecific Mycorrhizal Networks and Non-networking Hosts: Exploring the Ecology of the Host Genus *Alnus*», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Publishing, 2015) pp. 227-254. Kerényi, C., *Dionysus: Archetypal Image of Indestructible Life* (Princeton, New Jersey, Prince- ton University Press, 1976).
Kern, V. D., «Gravitropism of basidiomycetous fungi – on Earth and in microgravity», *Advances in Space Research*, 24 (1999), pp. 697-706.
Khan, S., Nadir, S., Shah, Z., Shah, A., Karunarathna, S. C., Xu, J., Khan, A., Munir, S., Hasan, F., «Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*», *Environmental Pollution*, 225 (2017), pp. 469-480.
Kiers, E. T., Denison, R. F., «Inclusive fitness in agriculture», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369 (2014), 20130367.
Kiers, T. E., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J. A., Franken, O., Verbruggen, E., Fellbaum, C., Fellbaum, C. R., Kowalchuk, G. A. et al., «Reciprocal rewards stabilize co-operation in the mycorrhizal symbiosis», *Science*, 333 (2011), pp. 880-882.
Kiers, T. E., West, S. A., Wyatt, G. A., Gardner, A., Bücking, H., Werner, G. D., «Misconceptions on the application of biological market theory to the mycorrhizal symbiosis», *Nature Plants*, 2 (2016), 16063.
Kim, G., LeBlanc, M. L., Wafula, E. K., dePamphilis, C. W., Westwood, J. H., «Genomic-scale exchange of mRNA between a parasitic plant and its hosts», *Science*, 345 (2014), pp. 808-811.
Kimmerer, R. W., *Braiding Sweetgrass* (Minneapolis, Minesota, Milkweed Editions, 2013).
King, A., «Technology: the future of agriculture», *Nature*, 544 (2017), pp. S21-23.
King, F. H., *Farmers of Forty Centuries* (Emmaus, Pensilvania, Organic Gardening Press, 1911), soilandhealth.org/wp-content/uploads/01aglibrary/010122king/ffc.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Kivlin, S. N., Emery, S. M., Rudgers, J. A., «Fungal symbionts alter plant responses to global change», *American Journal of Botany*, 100 (2013), pp. 1445-1457.
Klein, A.-M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., Tscharntke, T., «Importance of pollinators in changing landscapes for world crops», *Proceedings of the Royal Society B*, 274 (2007), pp. 303-313.
Klein, T., Siegwolf, R. T., Körner, C., «Below-ground carbon trade among tall trees in a tem- perate forest», *Science*, 352 (2016), pp. 342-344.
Kozo-Polyanksy, B. M., *Symbiogenesis: A New Principle of Evolution* (Cambridge, Massachu- setts, Harvard University Press, 2010).
Krebs, T. S., Johansen, P.-Ø., «Lysergic acid diethylamide (LSD) for alcoholism: metaanalysis of randomised controlled trials», *Journal of Psychopharmacology*, 26 (2012), pp. 994-1002.
Kroken, S., «"Miss Potter's First Love" – a rejoinder», *Inoculum*, 58 (2007), p. 14.
Kusari, S., Singh, S., Jayabaskaran, C., «Biotechnological potential of plant-associated en- dophytic fungi: hope versus hype», *Trends in Biotechnology*, 32 (2014), pp. 297-303.
Ladinsky, D., *Love Poems from God* (Nueva York, Penguin, 2002).
Ladinsky, D., *A Year with Hafiz: Daily Contemplations* (Nueva York, Penguin, 2010).
Lai, J., Koh, C., Tjota, M., Pieuchot, L., Raman, V., Chandrababu, K., Yang, D., Wong, L., Jedd, G., «Intrinsically disordered proteins aggregate at fungal cell-to-cell channels and regulate intercellular connectivity», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (2012), pp. 15781-15786.

Lalley, J., Viles, H., «Terricolous lichens in the northern Namib Desert of Namibia: distribu- tion and community composition», *Lichenologist*, 37 (2005), pp. 77-91.

Lanfranco, L., Fiorilli, V., Gutjahr, C., «Partner communication and role of nutrients in the arbuscular mycorrhizal symbiosis», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1031-1046.

Latty, T., Beekman, M., «Irrational decision-making in an amoeboid organism: transitivity and context-dependent preferences», *Proceedings of the Royal Society B*, 278 (2011), pp. 307-312.

Le Guin, U., «Deep in Admiration», en A. Tsing, H. Swanson, E. Gan y N. Bubandt eds., *Arts of Living on a Damaged Planet: Ghosts of the Anthropocene* (Minneapolis, University of Minnesota Press, 2017), pp. M15-21.

Leake, J., Johnson, D., Donnelly, D., Muckle, G., Boddy, L., Read, D., «Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning», *Canadian Journal of Botany*, 82 (2004), pp. 1016- 1045.

Leake, J., Read, D., «Mycorrhizal Symbioses and Pedogenesis Throughout Earth's History», en N. Johnson, C. Gehring y J. Jansa eds., *Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage* (Oxford, Elsevier, 2017), pp. 9-33.

Leary, T., «The Initation of the "High Priest"», en R. Metzner ed., *Sacred Mushrooms of Visions: Teonanacatl* (Rochester, Vermont, Park Street Press, 2005), pp. 160-178.

Lederberg. J., «Cell genetics and hereditary symbiosis», *Physiological Reviews*, 32 (1952), pp. 403-430.

Lederberg, J., Cowie, D., «Moondust; the study of this covering layer by space vehicles may offer clues to the biochemical origin of life», *Science*, 127 (1958), pp. 1473-1475.

Ledford, H., «Billion-year-old fossils set back evolution of earliest fungi», *Nature* (2019), www.nature.com/articles/d41586-019-01629-1 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Lee, N. N., Friz, J., Fries, M. D., Gil, J. F., Beck, A., Pellinen-Wannberg, A., Schmitz, B., Steele, A., Hofmann, B. A., «The Extreme Biology of Meteorites: Their Role in Understanding the Origin and Distribution of Life on Earth and in the Universe», en H. Stan-Lotter y S. Fendrihan eds., *Adaptation of Microbial Life to Environmental Extremes* (Springer International Publishing, 2017), pp. 283-325.

Lee, Y., Mazmanian, S. K., «Has the microbiota played a critical role in the evolution of the adaptive immune system?», *Science*, 330 (2010), pp. 1768-1773.

Legras, J., Merdinoglu, D., Couet, J., Karst, F., «Bread, beer and wine: *Saccharomyces cerevisiae* diversity reflects human history», *Molecular Ecology*, 16 (2007), pp. 2091-2102.

Lehmann, A., Leifheit, E. F., Rillig, M. C., «Mycorrhizas and Soil Aggregation», en N. Johnson, C. Gehring y J. Jansa eds., *Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage* (Oxford, Elsevier, 2017), pp. 241-262.

Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, K. E., Rillig, M. C., «Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation – a meta-anal- ysis», *Plant and Soil*, 374 (2014), pp. 523-537.

Lekberg, Y., Helgason, T., «*In situ* mycorrhizal function – knowledge gaps and future direc- tions», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 957-962.

Leonhardt, Y., Kakoschke, S., Wagener, J., Ebel, F., «Lah is a transmembrane protein and requires Spa 10 for stable positioning of Woronin bodies at the septal pore of *Aspergillus fumigatus*», *Scientific Reports*, 7 (2017), 44179.

Letcher, A., *Shroom: A Cultural History of the Magic Mushroom* (Londres, Faber & Faber, 2006).

Lévi-Strauss, C., *From Honey to Ashes: Introduction to a Science of Mythology*, 2 (Nueva York, Harper & Row, 1973).

Levin, M., «The wisdom of the body: future techniques and approaches to morphogenetic fields in regenerative medicine, developmental biology and cancer», *Regenerative Medicine*, 6 (2011), pp. 667-673.

Levin, M., «Morphogenetic fields in embryogenesis, regeneration, and cancer: non-local control of complex patterning», *Biosystems*, 109 (2012), pp. 243-261.

Levin, S. A., «Self-organization and the emergence of complexity in ecological systems», *BioScience*, 55

(2005), pp. 1075-1079.
Lewontin, R., *The Triple Helix: Gene, Organism, and Environment* (Cambridge, Massachu- setts, Harvard University Press, 2000).
Lewontin, R., *It Ain't Necessarily So: The Dream of the Human Genome and Other Illusions* (Nueva York, New York Review of Books, 2001).
Li, N., Alfiky, A., Vaughan, M. M., Kang, S., «Stop and smell the fungi: fungal volatile metabolites are overlooked signals involved in fungal interaction with plants», *Fungal Biology Reviews*, 30 (2016), pp. 134-144.
Li, Q., Yan, L., Ye, L., Zhou, J., Zhang, B., Peng, W., Zhang, X., Li, X., «Chinese black truffle *(Tuber indicum)*alters the ectomycorrhizosphere and endoectomycosphere microbiome and metabolic profiles of the host tree *Quercus aliena*», *Frontiers in Microbiology*, 9 (2018), 2202.
Lindahl. B., Finlay, R., Olsson, S., «Simultaneous, bidirectional translocation of 32P and 33P between wood blocks connected by mycelial cords of *Hypholoma fasciculare*», *New Phytologist*, 150 (2001), pp. 189-194.
Linnakoski, R., Reshamwala, D., Veteli, P., Cortina-Escribano, M., Vanhanen, H., Marjomäki, V., «Antiviral agents from fungi: diversity, mechanisms and potential appli- cations», *Frontiers in Microbiology*, 9 (2018), 2325.
Lintott, C., *The Crowd and the Cosmos: Adventures in the Zooniverse* (Oxford, Oxford Univer- sity Press, 2019).
Lipnicki, L. I., «The role of symbiosis in the transition of some eukaryotes from aquatic to terrestrial environments», *Symbiosis*, 65 (2015), pp. 39-53.
Liu, J., Martinez-Corral, R., Prindle, A., Lee, D.-Y. D., Larkin, J., Gabalda-Sagarra, M., Garcia-Ojalvo, J., Süel, G. M., «Coupling between distant biofilms and emergence of nutrient time-sharing», *Science*, 356 (2017), pp. 638-642.
Lohberger, A., Spangenberg, J. E., Ventura, Y., Bindschedler, S., Verrecchia, E. P., Bshary, R., Junier, P., «Effect of organic carbon and nitrogen on the interactions of *Morchella* spp. and bacteria dispersing on their mycelium», *Frontiers in Microbiology*, 10 (2019), 124.
Löpez-Franco, R., Bracker, C. E., «Diversity and dynamics of the Spitzenkörper in growing hyphal tips of higher fungi», *Protoplasma*, 195 (1996), pp. 90-111.
Loron, C. C., François, C., Rainbird, R. H., Turner, E. C., Borensztajn, S., Javaux, E. J., «Early fungi from the Proterozoic era in Arctic Canada», *Nature*, 570 (2019), pp. 232-235.
Lovett, B., Bilgo, E., Millogo, S., Ouattarra, A., Sare, I., Gnambani, E., Dabire, R. K., Diabate, A., Leger, R.J., «Transgenic *Metarhizium* rapidly kills mosquitoes in a mala- ria-endemic region of Burkina Faso», *Science*, 364 (2019), pp. 894-897.
Lu, C., Yu, Z., Tian, H., Hennessy, D. A., Feng, H., Al-Kaisi, M., Zhou, Y., Sauer, T., Arritt, R., «Increasing carbon footprint of grain crop production in the US Western Corn Belt», *Environmental Research Letters*, 13 (2018), 124007.
Luo, J., Chen, X., Crump, J., Zhou, H., Davies, D. G., Zhou, G., Zhang, N., Jin, C., «Interactions of fungi with concrete: significant importance for bio-based self-healing con- crete», *Construction and Building Materials*, 164 (2018), pp. 275-285.
Lutzoni, F., Nowak, M. D., Alfaro, M. E., Reeb, V., Miadlikowska, J., Krug, M., Arnold, E. A., Lewis, L. A., Swofford, D. L., Hibbett, D. et al., «Contemporaneous radiations of fungi and plants linked to symbiosis», *Nature Communications*, 9 (2018), 5451.
Lutzoni, F., Pagel, M., Reeb, V., «Major fungal lineages are derived from lichen symbiotic ancestors», *Nature*, 411 (2001), pp. 937-940.
Ly, C., Greb, A. C., Cameron, L. P., Wong, J. M., Barragan, E. V., Wilson, P. C., Burbach, K. F., Zarandi, S., Sood, A., Paddy, M. R. et al., «Psychedelics promote structural and func- tional neural plasticity», *Cell Reports*, 23 (2018), pp. 3170-3182.
Lyons, T., Carhart-Harris, R. L., «Increased nature relatedness and decreased authoritarian political views after psilocybin for treatment-resistant depression», *Journal of Psychopharmacology*, 32 (2018), pp.

811-819.
Ma, Z., Guo, D., Xu, X., Lu, M., Bardgett, R. D., Eissenstat, D. M., McCormack, L. M., Hedin, L. O., «Evolutionary history resolves global organization of root functional traits», *Nature*, 555 (2018), pp. 94-97.
MacLean, K. A., Johnson, M. W., Griffiths, R. R., «Mystical experiences occasioned by the hallucinogen psilocybin lead to increases in the personality domain of openness», *Journal of Psychopharmacology*, 25 (2011), pp. 1453-1461.
Mangold, C. A., Ishler, M. J., Loreto, R. G., Hazen, M. L., Hughes, D. P., «Zombie ant death grip due to hypercontracted mandibular muscles», *Journal of Experimental Biology*, 222 (2019), jeb200683.
Manicka, S., Levin, M., «The Cognitive Lens: a primer on conceptual tools for analysing information processing in developmental and regenerative morphogenesis», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374 (2019), 20180369.
Manoharan, L., Rosenstock, N. P., Williams, A., Hedlund, K., «Agricultural management practices influence AMF diversity and community composition with cascading ef- fects on plant productivity», *Applied Soil Ecology*, 115 (2017), pp. 53-59.
Mardhiah, U., Caruso, T., Gurnell, A., Rillig, M. C., «Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae reduce soil erosion by surface water flow in a greenhouse experiment», *Applied Soil Ecology*, 99 (2016), pp. 137-140.
Margonelli, L., *Underbug: An Obsessive Tale of Termites and Technology* (Nueva York, Farrar, Strauss & Giroux, 2018).
Margulis, L., *Symbiosis in Cell Evolution: Life and Its Environment on the Early Earth* (SanFran- cisco, Califorina, W. H. Freeman, 1981).
Margulis, L., «Gaia Is a Tough Bitch», en John Brockman ed., *The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution* (Nueva York, Touchstone, 1996).
Margulis, L., *The Symbiotic Planet: A New Look at Evolution* (Londres, Phoenix, 1999).
Markram, H., Muller, E., Ramaswamy, S., Reimann, M. W., Abdellah, M., Sanchez, C., Ailamaki, A., Alonso-Nanclares, L., Antille, N., Arsever, S. et al., «Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry», *Cell*, 163 (2015), pp. 456-492.
Marley, G., *Chanterelle Dreams, Amanita Nightmares: The Love, Lore, and Mystique of Mushrooms* (White River Junction, Vermont, Chelsea Green, 2010).
Márquez, L. M., Redman, R. S., Rodriguez, R. J., Roossinck, M. J., «A virus in a fungus in a plant: three-way symbiosis required for thermal tolerance», *Science*, 315 (2007), pp. 513-515.
Martin, F. M., Uroz, S., Barker, D. G., «Ancestral alliances: plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria», *Science* 356 (2017), eaad4501.
Martinez-Corral, R., Liu., Prindle, A., Süel, G. M., Garcia-Ojalvo, J., «Metabolic basis of brain-like electrical signalling in bacterial communities», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374 (2019), 20180382.
Martínez-García, L. B., De Deyn, G. B., Pugnaire, F. I., Kothamasi, D., Van der Heijden, M. G., «Symbiotic soil fungi enhance ecosystem resilience to climate change», *Global Change Biology*, 23 (2017), pp. 5228-5236.
Masiulionis, V. E., Weber, R. W., Pagnocca, F. C., «Foraging of *Psilocybe* basidiocarps by the leaf-cutting ant *Acromyrmex lobicornis*in Santa Fe, Argentina», *SpringerPlus*, 2 (2013), 254.
Mateus, I. D., Masclaux, F. G., Aletti, C., Rojas, E. C., Savary, R., Dupuis, C., Sanders, I. R., «Dual RNA-seq reveals large-scale non-conserved genotype × genotype-specific genetic reprograming and molecular crosstalk in the mycorrhizal symbiosis», *ISME Journal*, 13 (2019), pp. 1226-1238.
Matossian, M. K., «Ergot and the Salem Witchcraft Affair: An outbreak of a type of food poisoning known as convulsive ergotism may have led to the 1692 accusations of witchcraft», *American Scientist*, 70 (1982), pp. 355-357.
Matsuura, K., Yashiro, T., Shimizu, K., Tatsumi, S., Tamura, T., «Cuckoo fungus mimics termite eggs by producing the cellulose-digesting enzyme β-Glucosidase», *Current Biology*, 19 (2009), pp. 30-36.

Matsuura, Y., Moriyama, M., Łukasik, P., Vanderpool, D., Tanahashi, M., Meng, X.-Y., McCutcheon, J. P., Fukatsu, T., «Recurrent symbiont recruitment from fungal parasites in cicadas», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (2018), E5970-E5979.

Maugh, T. H., «The scent makes sense», *Science*, 215 (1982), p. 1224.

Maxman, A., «CRISPR might be the banana's only hope against a deadly fungus», *Nature* (2019), www.nature.com/articles/d41586-019-02770-7 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Mazur, S., «Lynne Margulis: "Intimacy of Strangers & Natural Selection"», *Scoop* (2009), www.scoop.co.nz/stories/HL0903/S00194/lynn-margulis-intimacy-of-strangers-natural-selection.htm [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Mazzucato, L., Camera, L. G., Fontanini, A., «Expectation-induced modulation of metastable activity underlies faster coding of sensory stimuli», *Nature Neuroscience*, 22 (2019), pp. 787-796.

McCoy, P., *Radical Mycology: A Treatise on Working and Seeing with Fungi* (Portland, Oregón, Chthaeus Press, 2016).

McFall-Ngai, M., «Adaptive immunity: care for the community», *Nature*, 445 (2007), p. 153. McGann, J. P., «Poor human olfaction is a 19th-century myth», *Science*, 356 (2017), eaam7263. McGuire, K. L., «Common ectomycorrhizal networks may maintain monodominance in a tropical rain forest», *Ecology*, 88 (2007), pp. 567-574.

McKenna, D., *Brotherhood of the Screaming Abyss* (Clearwater, Minnesota, North Star Press of St. Cloud Inc., 2012).

McKenna, T., *Food of the Gods: The Search for the Original Tree of Knowledge* (Nueva York, Bantam, 1992).

McKenna, T., McKenna, D. (Oss OT y Oeric ON), *Psilocybin: Magic Mushroom Grower's Guide* (Berkeley, California, AND/OR Press, 1976).

McKenzie, R. N., Horton, B. K., Loomis, S. E., Stockli, D. F., Planavsky, N. J., Lee, C.-T. A., «Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variabi- lity», *Science*, 352 (2016), pp. 444-447.

McKerracher, L., Heath, I., «Fungal nuclear behavior analysed by ultraviolet microbeam irradiation», *Cell Motility and the Cytoskeleton*, 6 (1986a), pp. 35-47.

McKerracher, L., Heath, I., «Polarized cytoplasmic movement and inhibition of saltations induced by calcium-mediated effects of microbeams in fungal hyphae», *Cell Motility and the Cytoskeleton*, 6 (1986b), pp. 136-145.

Meeßen, J., Backhaus, T., Brandt, A., Raguse, M., Böttger, U., De Vera, J. P., De la Torre, R., «The effect of high-dose ionizing radiation on the isolated photobiont of the astrobio- logical model lichen *Circinaria gyrosa*», *Astrobiology*, 17 (2017), pp. 154-162.

Mejía, L. C., Herre, E. A., Sparks, J. P., Winter, K., García, M. N., Bael, S. A., Stitt, J., Shi, Z., Zhang, Y., Guiltinan, M. J. et al., «Pervasive effects of a dominant foliar endophytic fungus on host genetic and phenotypic expression in a tropical tree», *Frontiers in Microbiology*, 5 (2014), 479.

Merckx, V., «Mycoheterotrophy: An Introduction», en V. Merckx ed., *Mycoheterotrophy – The Biology of Plants Living on Fungi* (Springer International Publishing, 2013), *pp. 1-18*.

Merleau-Ponty, M., *Phenomenology of Perception* (Londres, Routledge Classics, 2002).

Meskkauskas, A., McNulty, L. J., Moore, D., «Concerted regulation of all hyphal tips generates fungal fruit body structures: experiments with computer visualizations produced by a new mathematical model of hyphal growth», *Mycological Research*, 108 (2004), pp. 341-353.

Metzner, R., «Introduction: Visionary Mushrooms of the Americas», en R. Metzner ed., *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl* (Rochester, Vermont, Park Street Press, 2005), pp. 1-48.

Miller, M. J., Albarracin-Jordan, J., Moore, C., Capriles, J. M., «Chemical evidence for the use of multiple psychotropic plants in a 1,000-year-old ritual bundle from South America», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (2019), pp. 11207-1112.

Mills, B. J., Batterman, S. A., Field, K. J., «Nutrient acquisition by symbiotic fungi governs Palaeozoic climate transition», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 373 (2017), 20160503.

Milner, D. S., Attah, V., Cook, E., Maguire, F., Savory, F. R., Morrison, M., Müller, C. A., Foster, P. G., Talbot, N. J., Leonard, G. et al., «Environment-dependent fitness gains can be driven by horizontal gene transfer of transporter-encoding genes», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (2019), 201815994.

Moeller, H. V., Neubert, M. G., «Multiple friends with benefits: an optimal mutualist mana- gement strategy?», *American Naturalist*, 187 (2016), E1-12.

Mohajeri, H. M., Brummer, R. J., Rastall, R. A., Weersma, R. K., Harmsen, H. J., Faas, M., Eggersdorfer, M., «The role of the microbiome for human health: from basic science to clinical applications», *European Journal of Nutrition*, 57 (2018), pp. 1-14.

Mohan, J. E., Cowden, C. C., Baas, P., Dawadi, A., Frankson, P. T., Helmick, K., Hughes, E., Khan, S., Lang, A., Machmuller, M. et al., «Mycorrhizal fungi mediation of terrestrial ecosystem responses to global change: mini-review», *Fungal Ecology*, 10 (2014), pp. 3-19.

Moisan, K., Cordovez, V., Van de Zande, E. M., Raaijmakers, J. M., Dicke, M., Lucas-Barbosa, D., «Volatiles of pathogenic and non-pathogenic soil-borne fungi affect plant development and resistance to insects», *Oecologia*, 190 (2019), pp. 589-604.

Monaco, E., «The Secret History of Paris's Catacomb Mushrooms», *Atlas Obscura* (2017), www.atlasobscura.com/articles/paris-catacomb-mushrooms [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Mondo, S. J., Lastovetsky, O. A., Gaspar, M. L., Schwardt, N. H., Barber, C. C., Riley, R., Sun, H., Grigoriev, I. V., Pawlowska, T. E., «Bacterial endosymbionts influence host sexuality and reveal reproductive genes of early divergent fungi», *Nature Communications*, 8 (2017), 1843.

Money, N. P., «More g's than the Space Shuttle: ballistospore discharge», *Mycologia*, 90 (1998), p. 547.

Money, N. P., «Fungus punches its way in», *Nature*, 401 (1999), pp. 332-333.

Money, N. P., «The fungal dining habit: a biomechanical perspective», *Mycologist*, 18 (2004a), pp. 71-76.

Money, N. P., «Theoretical biology: mushrooms in cyberspace», *Nature*, 431 (2004b), p. 32.

Money, N. P., *Triumph of the Fungi: A Rotten History* (Oxford, Oxford University Press, 2007).

Money, N. P., «Against the naming of fungi», *Fungal Biology*, 117 (2013), pp. 463-465.

Money, N. P., *Fungi: A Very Short Introduction* (Oxford, Oxford University Press, 2016).

Money, N. P., *The Rise of Yeast* (Oxford, Oxford University Press, 2018).

Montañez, I., «A Late Paleozoic climate window of opportunity», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (2016), pp. 2334-2336.

Montiel-Castro, A. J., González-Cervantes, R. M., Bravo-Ruiseco, G., Pacheco-López, G., «The microbiota-gut-brain axis: neurobehavioral correlates, health and sociality», *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7 (2013), 70.

Moore, D., Hock, B., Greening, J. P., Kern, V. D., Frazer, L., Monzer, J., «Gravimorphogenesis in agarics», *Mycological Research*, 100 (1996), pp. 257-273.

Moore D., «Graviresponses in fungi», *Advances in Space Research*, 17 (1996), pp. 73-82.

Moore, D., «Principles of mushroom developmental biology», *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 7 (2005), pp. 79-101.

Moore, D., *Fungal Biology in the Origin and Emergence of Life* (Cambridge, Cambridge Uni- versity Press, 2013a).

Moore, D., *Slayers, Saviors, Servants, and Sex: An Exposé of Kingdom Fungi* (Springer Interna- tional Publishing, 2013b).

Moore, D., Robson, G. D., Trinci, A. P. J., *21st-Century Guidebook to Fungi* (Cambridge, Cam- bridge University Press, 2011).

Mousavi, S. A., Chauvin, A., Pascaud, F., Kellenberger, S., Farmer, E. E., «Glutamate receptor-like genes mediate leaf-to-leaf wound signalling», *Nature*, 500 (2013), pp. 422- 426.

Muday, G. K., Brown-Harding, H., «Nervous system-like signaling in plant defense», *Science*, 361 (2018), pp. 1068-1069.

Mueller, R. C., Scudder, C. M., Whitham, T. G., Gehring, C. A., «Legacy effects of tree mortality mediated

by ectomycorrhizal fungal communities», *New Phytologist*, 224 (2019), pp. 155-165.

Muir, J., *The Yosemite* (Nueva York, The Century Company, 1912), vault.sierraclub.org/john_muir_exhibit/writings/the_yosemite/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Myers, N., «Conversations on plant sensing: notes from the field», *NatureCulture*, 3 (2014), pp. 35-66.

Naef, R., «The volatile and semi-volatile constituents of agarwood, the infected heartwood of *Aquilaria* species: a review», *Flavour and Fragrance Journal*, 26 (2011), pp. 73-87.

Nakagaki, T., Yamada, H., Tóth, A., «Maze-solving by an amoeboid organism», *Nature*, 407 (2000), p. 470.

Nelsen, M. P., DiMichele, W. A., Peters, S. E., Boyce, K. C., «Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (2016), pp. 2442-2447.

Nelson, M. L., Dinardo, A., Hochberg, J., Armelagos, G. J., «Mass spectroscopic characterization of tetracycline in the skeletal remains of an ancient population from Sudanese Nubia 350-550 ce», *American Journal of Physical Anthropology*, 143 (2010), pp. 151-154.

Newman, E. I., «Mycorrhizal links between plants: their functioning and ecological signif- icance», *Advances in Ecological Research*, 18 (1988), pp. 243-270.

Nikolova, I., Johanson, K. J., Dahlberg, A., «Radiocaesium in fruitbodies and mycorrhizae in ectomycorrhizal fungi», *Journal of Environmental Radioactivity*, 37 (1997), pp. 115- 125.

Niksic, M., Hadzic, I., Glisic, M., «Is *Phallus impudicus* a mycological giant?’ *Mycologist*, 18 (2004), pp. 21-22.

Noë, R., Hammerstein, P., «Biological markets», *Trends in Ecology & Evolution*, 10 (1995), pp. 336-339.

Noë, R., Kiers, T. E., «Mycorrhizal markets, firms, and co-ops», *Trends in Ecology & Evolution*, 33 (2018), pp. 777-789.

Nordbring-Hertz, B., «Morphogenesis in the nematode-trapping fungus *Arthrobotrys oligospora* – an extensive plasticity of infection structures», *Mycologist*, 18 (2004), pp. 125-133.

Nordbring-Hertz, B., Jansson, H., Tunlid, A., «Nematophagous Fungi», en *Encyclopedia of Life Sciences* (Chichester, John Wiley, 2011).

Novikova, N., Boever, P., Poddubko, S., Deshevaya, E., Polikarpov, N., Rakova, N., Coninx, I., Mergeay, M., «Survey of environmental biocontamination on board the Interna- tional Space Station», *Research in Microbiology*, 157 (2006), pp. 5-12.

O’Malley, M. A., «Endosymbiosis and its implications for evolutionary theory», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (2015), pp. 10270-10277.

O’Regan, H. J., Lamb, A. L., Wilkinson, D. M., «The missing mushrooms: searching for fungi in ancient human dietary analysis», *Journal of Archaeological Science*, 75 (2016), pp. 139-143.

Oettmeier, C., Brix, K., Döbereiner, H.-G., «*Physarum polycephalum* – a new take on a classic model system», *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50 (2017), p. 41.

Oliveira, A. G., Stevani, C. V., Waldenmaier, H. E., Viviani, V., Emerson, J. M., Loros, J. J., Dunlap, J. C., «Circadian control sheds light on fungal bioluminescence», *Current Biology*, 25 (2015), pp. 964-968.

Olsson, S., «Nutrient Translocation and Electrical Signalling in Mycelia», en N. A. R. Gow, G. D. Robson y G. M. Gadd eds., *The Fungal Colony* (Cambridge, Cambridge Univer- sity Press, 2009), pp. 25-48.

Olsson, S., Hansson, B., «Action potential-like activity found in fungal mycelia is sensitive to stimulation», *Naturwissenschaften*, 82 (1995), pp. 30-31.

Oolbekkink, G. T., Kuyper, T. W., «Radioactive caesium from Chernobyl in fungi», *Mycologist*, 3 (1989), pp. 3-6.

Orrell, P., *Linking Above and Below-Ground Interactions in Agro-Ecosystems: An Ecological Network Approach*, tesis doctoral, Universidad de Newcastle, Newcastle (2018), theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4102 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Osborne, O. G., De-Kayne, R., Bidartondo, M. I., Hutton, I., Baker, W. J., Turnbull, C. G., Savolainen, V., «Arbuscular mycorrhizal fungi promote coexistence and niche divergence of sympatric palm species

on a remote oceanic island», *New Phytologist*, 217 (2018), pp. 1254-1266.

Ott, J., «Pharmaka, philtres, and pheromones. Getting high and getting off», *MAPS*, 12 (2002), pp. 26-32.

Otto, S., Bruni, E. P., Harms, H., Wick, L. Y., «Catch me if you can: dispersal and foraging of *Bdellovibrio bacteriovorus* 109J along mycelia», *ISME Journal*, 11 (2017), pp. 386-393.

Ouellette, N. T., «Flowing crowds», *Science*, 363 (2019), pp. 27-28.

Oukarroum, A., Gharous, M., Strasser, R. J., «Does *Parmelina tiliacea* lichen photosystem II survive at liquid nitrogen temperatures?», *Cryobiology*, 74 (2017), pp. 160-162.

Ovid, *Ovid: The Metamorphoses*, Gregory, H., trans. (Nueva York, Viking Press, 1958).

Pagán, O. R., «The brain: a concept in flux», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374 (2019), 20180383.

Paglia, C., *Sexual Personae: Art and Decadence from Nefertiti to Emily Dickinson* (New Haven, Connecticut, Yale University Press, 2001).

Pan, X., Pike, A., Joshi, D., Bian, G., McFadden, M. J., Lu, P., Liang, X., Zhang, F., Raikhel, A. S., Xi, Z., «The bacterium *Wolbachia* exploits host innate immunity to establish a symbiotic relationship with the dengue vector mosquito *Aedes aegypti*», *ISME Journal*, 12 (2017), pp. 277-288.

Patra, S., Banerjee, S., Terejanu, G., Chanda, A., «Subsurface pressure profiling: a novel mathematical paradigm for computing colony pressures on substrate during fungal infections», *Scientific Reports*, 5 (2015), 12928.

Peay, K. G., «The mutualistic niche: mycorrhizal symbiosis and community dynamics», *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 47 (2016), pp. 1-22.

Peay, K. G., Kennedy, P. G., Talbot, J. M., «Dimensions of biodiversity in the Earth mycobio- me», *Nature Reviews Microbiology*, 14 (2016), pp. 434-447.

Peintner, U., Poder, R., Pumpel, T., «The iceman's fungi», *Mycological Research*, 102 (1998), pp. 1153-1162.

Pennazza, G., Fanali, C., Santonico, M., Dugo, L., Cucchiarini, L., Dachà, M., D'Amico, A., Costa, R., Dugo, P., Mondello, L., «Electronic nose and GC-MS analysis of volatile compounds in *Tuber magnatum* Pico: evaluation of different storage conditions», *Food Chemistry*, 136 (2013), pp. 668-674.

Pennisi, E., «Chemicals released by bacteria may help gut control the brain, mouse study suggests», *Science* (2019a), www.sciencemag.org/news/2019/10/chemicals-releasedbacteria-may-help-gut-control-brain-mouse-study-suggests [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Pennisi, E., «Algae suggest eukaryotes get many gifts of bacteria DNA», *Science*, 363 (2019b), pp. 439-440.

Peris, J. E., Rodríguez, A., Peña, L., Fedriani, J., «Fungal infestation boosts fruit aroma and fruit removal by mammals and birds», *Scientific Reports*, 7 (2017), 5646.

Perrottet, T., «Mt. Rushmore», *Smithsonian Magazine* (2006), www.smithsonianmag.com/travel/mt-rushmore-116396890/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Petri, G., Expert, P., Turkheimer, F., Carhart-Harris, R., Nutt, D., Hellyer, P., Vaccarino, F., «Homological scaffolds of brain functional networks», *Journal of the Royal Society Interface*, 11 (2014), 20140873.

Pfeffer, C., Larsen, S., Song, J., Dong, M., Besenbacher, F., Meyer, R., Kjeldsen, K., Schreiber, L., Gorby, Y. A., El-Naggar, M. Y. et al., «Filamentous bacteria transport electrons over centimetre distances», *Nature*, 491 (2012), pp. 218-221.

Phillips, R. P., Brzostek, E., Midgley, M. G., «The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests», *New Phytologist*, 199 (2013), pp. 41-51.

Pickles, B., Egger, K., Massicotte, H., Green, D., «Ectomycorrhizas and climate change», *Fungal Ecology*, 5 (2012), pp. 73-84.

Pickles, B. J., Wilhelm, R., Asay, A. K., Hahn, A. S., Simard, S. W., Mohn, W. W., «Transfer of 13C between paired Douglas fir seedlings reveals plant kinship effects and uptake of exudates by ectomycorrhizas», *New Phytologist*, 214 (2017), pp. 400-411.

Pion, M., Spangenberg, J., Simon, A., Bindschedler, S., Flury, C., Chatelain, A., Bshary, R., Job, D., Junier,

P., «Bacterial farming by the fungus *Morchella crassipes*», *Proceedings of the Royal Society B*, 280 (2013), 20132242.
Pirozynski, K. A., Malloch, D. W., «The origin of land plants: a matter of mycotrophism», *Biosystems*, 6 (1975), pp. 153-164.
Pither, J., Pickles, B. J., Simard, S. W., Ordonez, A., Williams, J. W., «Below-ground biotic interactions moderated the postglacial range dynamics of trees», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1148-1160.
Policha, T., Davis, A., Barnadas, M., Dentinger, B. T., Raguso, R. A., Roy, B. A., «Disentangling visual and olfactory signals in mushroom-mimicking *Dracula*orchids usingrealistic three-dimensional printed flowers», *New Phytologist*, 210 (2016), pp. 1058-1071.
Pollan, M., «The Intelligent Plant», *New Yorker* (2013), michaelpollan.com/articles-archive/the-intelligent-plant/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Pollan, M., *How to Change Your Mind: The New Science of Psychedelics* (Londres, Penguin, 2018).
Popkin, G., «Bacteria Use Brainlike Bursts of Electricity to Communicate», *Quanta* (2017), www.quantamagazine.org/bacteria-use-brainlike-bursts-of-electricity-to-communicate-20170905/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Porada, P., Weber, B., Elbert, W., Pöschl, U., Kleidon, A., «Estimating impacts of lichens and bryophytes on global biogeochemical cycles», *Global Biogeochemical Cycles*, 28 (2014), pp. 71-85.
Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W. E., «Global pollinator declines: trends, impacts and drivers», *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (2010), pp. 345-353.
Poulsen, M., Hu, H., Li, C., Chen, Z., Xu, L., Otani, S., Nygaard, S., Nobre, T., Klaubauf, S., Schindler, P. M. et al., «Complementary symbiont contributions to plant decomposition in a fungus-farming termite», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (2014), pp. 14500-14505.
Powell, J. R., Rillig, M. C., «Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1059-1075.
Powell, M., *Medicinal Mushrooms: A Clinical Guide* (Bath, Mycology Press, 2014).
Pozo, M. J., López-Ráez, J. A., Azcón-Aguilar, C., García-Garrido, J. M., «Phytohormones as integrators of environmental signals in the regulation of mycorrhizal symbioses», *New Phytologist*, 205 (2015), pp. 1431-1436.
Prasad, S., «An ingenious way to combat India's suffocating pollution», *Washington Post* (2018), www.washingtonpost.com/news/theworldpost/wp/2018/08/01/india-pollution/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Pressel, S., Bidartondo, M. I., Ligrone, R., Duckett, J. G., «Fungal symbioses in bryophytes: new insights in the twenty-first century», *Phytotaxa*, 9 (2010), pp. 238-253.
Prigogine, I., Stengers, I., *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature* (Nueva York, Bantam, 1984).
Prindle, A., Liu, J., Asally, M., Ly, S., Garcia-Ojalvo, J., Süel, G. M., «Ion channels enable electrical communication in bacterial communities», *Nature*, 527 (2015), pp. 59-63.
Purschwitz, J., Müller, S., Kastner, C., Fischer, R., «Seeing the rainbow: light sensing in fungi», *Current Opinion in Microbiology*, 9 (2006), pp. 566-571.
Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P., Korsbakken, J., Peters, G. P., Canadell, J. G. et al., «Global Carbon Budget 2018», *Earth System Science Data Discussions* (2018), doi.org/10.5194/essd-2018-120.
Quintana-Rodriguez, E., Rivera-Macias, L. E., Adame-Alvarez, R. M., Torres, J., Heil, M., «Shared weapons in fungus-fungus and fungus-plant interactions? Volatile organic compounds of plant or fungal origin exert direct antifungal activity *in vitro*», *Fungal Ecology*, 33 (2018), pp. 115-121.
Quirk. J., Andrews, M., Leake, J., Banwart, S., Beerling, D., «Ectomycorrhizal fungi and past high CO2 atmospheres enhance mineral weathering through increased be- low-ground carbon-energy fluxes», *Biology Letters*, 10 (2014), 20140375.
Rabbow, E., Horneck, G., Rettberg, P., Schott, J.-U., Panitz, C., L'Afflitto, A., Von Heise-Rotenburg, R., Willnecker, R., Baglioni, P., Hatton, J. et al., «EXPOSE, an astrobiological exposure facility on the

International Space Station – from proposal to flight», *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 39 (2009), pp. 581-598.
Raes, J., «Crowdsourcing Earth's microbes», *Nature*, 551 (2017), pp. 446-447.
Rambold, G., Stadler, M., Begerow, D., «Mycology should be recognised as a field in biology at eye level with other major disciplines – a memorandum», *Mycological Progress*, 12 (2013), pp. 455-463.
Ramsbottom, J., *Mushrooms and Toadstools* (Londres, Collins, 1953).
Raverat, G., *Period Piece: A Cambridge Childhood* (Londres, Faber, 1952).
Rayner, A., *Degrees of Freedom* (Londres, World Scientific, 1997).
Rayner, A., Griffiths, G. S., Ainsworth, A. M., «Mycelial Interconnectedness», en N. A. R. Gow y G. M. Gadd eds., *The Growing Fungus* (Londres, Chapman & Hall, 1995), pp. 21-40.
Rayner, M., *Trees and Toadstools* (Londres, Faber, 1945).
Read, D., «Mycorrhizal fungi: the ties that bind», *Nature*, 388 (1997), pp. 517-518.
Read, N., «Fungal Cell Structure and Organization», en C. C. Kibbler, R. Barton, N. A. R. Gow, S. Howell, S., MacCallum, D. M. Manuel, y R. J eds.. *Oxford Textbook of Medical Mycology* (Oxford, Oxford University Press, 2018), pp. 23-34.
Read, N. D., Lichius, A., Shoji, J., Goryachev, A. B., «Self-signalling and self-fusion in fila- mentous fungi», *Current Opinion in Microbiology*, 12 (2009), pp. 608-615.
Redman, R. S., Rodriguez, R. J., «The Symbiotic Tango: Achieving Climate-Resilient Crops via Mutualistic Plant – Fungus Relationships», en S. Doty ed., *Functional Importance of the Plant Microbiome, Implications for Agriculture, Forestry and Bioenergy* (Springer International Publishing, 2017), pp. 71-87.
Rees, B., Shepherd, V. A., Ashford, A. E., «Presence of a motile tubular vacuole system in different phyla of fungi», *Mycological Research*, 98 (1994), pp. 985-992.
Reid, C. R., Latty, T., Dussutour, A., Beekman, M., «Slime mold uses an externalized spatial "memory" to navigate in complex environments», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (2012), pp. 17490-17494.
Relman, D. A., «"Til death do us part": coming to terms with symbiotic relationships», *Nature Reviews Microbiology*, 6 (2008), pp. 721-724.
Reynaga-Peña, C. G., Bartnicki-García, S., «Cytoplasmic contractions in growing fungal hyphae and their morphogenetic consequences», *Archives of Microbiology*, 183 (2005), pp. 292-300.
Reynolds, H. T., Vijayakumar, V., Gluck-Thaler, E., Korotkin, H., Matheny, P., Slot, J. C., «Horizontal gene cluster transfer increased hallucinogenic mushroom diversity», *Evolution Letters*, 2 (2018), pp. 88-101.
Rich, A., «Notes toward a Politics of Location», en *Blood, Bread, and Poetry: Selected Prose, 1979-1985* (Nueva York, W. W. Norton, 1994).
Richards, T. A., Leonard, G., Soanes, D. M., Talbot, N. J., «Gene transfer into the fungi», *Fungal Biology Reviews*, 25 (2011), pp. 98-110.
Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Camenzind, T., Cavagnaro, T. R., Degrune, F., Hohmann, P., Lammel, D. R., Mansour, I., Roy, J., Van der Heijden, M. G. et al., «Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis: a response to Ryan & Graham (2018), "Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops"», *New Phytologist*, 222 (2019), pp. 1171-1175.
Rillig, M. C., Lehmann, A., Lehmann, J., Camenzind, T., Rauh, C., «Soil biodiversity effects from field to fork», *Trends in Plant Science*, 23 (2018), pp. 17-24.
Riquelme, M., «Tip growth in filamentous fungi: a road trip to the apex», *Microbiology*, 67 (2012), pp. 587-609.
Ritz, K., Young, I., «Interactions between soil structure and fungi», *Mycologist*, 18 (2004), pp. 52-59.
Robinson, J. M., «Lignin, land plants, and fungi: biological evolution affecting Phanerozoic oxygen balance», *Geology*, 18 (1990), pp. 607-610.
Rodriguez, R., White, J. F., Arnold, A., Redman, R., «Fungal endophytes: diversity and func- tional roles»,

*New Phytologist*, 182 (2009), pp. 314-330.
Rodriguez-Romero, J., Hedtke, M., Kastner, C., Müller, S., Fischer, R., «Fungi, hidden in soil or up in the air: light makes a difference», *Microbiology*, 64 (2010), pp. 585-610.
Rogers, R., *The Fungal Pharmacy* (Berkeley, California, North Atlantic Books, 2012).
Roper, M., Dressaire, E., «Fungal biology: bidirectional communication across fungal net- works», *Current Biology*, 29 (2019), R130-2.
Roper, M., Lee, C., Hickey, P. C., Gladfelter, A. S., «Life as a moving fluid: fate of cytoplasmic macromolecules in dynamic fungal syncytia», *Current Opinion in Microbiology*, 26 (2015), pp. 116-122.
Roper, M., Seminara, A., «Mycofluidics: the fluid mechanics of fungal adaptation», *Annual Review of Fluid Mechanics*, 51 (2017), pp. 1-28.
Roper, M., Seminara, A., Bandi, M., Cobb, A., Dillard, H. R., Pringle, A., «Dispersal of fungal spores on a cooperatively generated wind», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (2010), pp. 17474-17479.
Roper, M., Simonin, A., Hickey, P. C., Leeder, A., Glass, L. N., «Nuclear dynamics in a fungal chimera», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (2013), pp. 12875- 12880.
Ross, A. A., Müller, K. M., Weese, J. S., Neufeld, J. D., «Comprehensive skin microbiome analysis reveals the uniqueness of human skin and evidence for phylosymbiosis within the class Mammalia», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (2018), E5786-5795.
Ross, S., Bossis, A., Guss, J., Agin-Liebes, G., Malone, T., Cohen, B., Mennenga, S., Belser, A., Kalliontzi, K., Babb, J. et al., «Rapid and sustained symptom reduction following psilocybin treatment for anxiety and depression in patients with life-threatening cancer: a randomized controlled trial», *Journal of Psychopharmacology*, 30 (2016), pp. 1165-1180.
Roughgarden, J., *Evolution's Rainbow* (Berkeley, University of California Press, 2013).
Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S., Bonini, P., Colla, G., «Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops», *Scientia Horticulturae*, 196 (2015), pp. 91-108.
Rubini, A., Riccioni, C., Arcioni, S., Paolocci, F., «Troubles with truffles: unveiling more of their biology», *New Phytologist*, 174 (2007), pp. 256-259.
Russell, B., *Portraits from Memory and Other Essays* (Nueva York, Simon & Schuster, 1956).
Ryan, M. H., Graham, J. H., «Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1092-1107.
Sagan, L., «On the origin of mitosing cells», *Journal of Theoretical Biology*, 14 (1967), pp. 225- 274.
Salvador-Recatalà, V., Tjallingii, F. W., Farmer, E. E., «Real-time, *in vivo* intracellular recordings of caterpillar-induced depolarization waves in sieve elements using aphid electrodes», *New Phytologist*, 203 (2014), pp. 674-684.
Sample, I., «Magma shift may have caused mysterious seismic wave event», *Guardian* (2018), www.theguardian.com/science/2018/nov/30/magma-shift-mysterious-seismic-wave-event-mayotte [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].
Samorini, G., *Animals and Psychedelics: The Natural World and the Instinct to Alter Consciousness* (Rochester, Vermont, Park Street Press, 2002).
Sancho, L. G., De la Torre, R., Pintado, A., «Lichens, new and promising material from ex- periments in astrobiology», *Fungal Biology Reviews*, 22 (2008), pp. 103-109.
Sapp, J., *Evolution by Association* (Oxford, Oxford University Press, 1994).
Sapp, J., «The dynamics of symbiosis: an historical overview», *Canadian Journal of Botany*, 82 (2004), pp. 1046-1056.
Sapp, J., *The New Foundations of Evolution* (Oxford, Oxford University Press, 2009).
Sapp, J., «The symbiotic self», *Evolutionary Biology*, 43 (2016), pp. 596-603.
Sapsford, S. J., Paap, T., Hardy, G. E., Burgess, T. I., «The "chicken or the egg": which comes first, forest tree decline or loss of mycorrhizae?», *Plant Ecology*, 218 (2017), pp. 1093-1106.

Sarrafchi, A., Odhammer, A. M., Salazar, L., Laska, M., «Olfactory sensitivity for six predator odorants in cd-1 mice, human subjects, and spider monkeys», *PLOS ONE*, 8 (2013), e80621.

Saupe, S., «Molecular genetics of heterokaryon incompatibility in filamentous ascomyce- tes», *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64 (2000), pp. 489-502.

Scharf, C., «How the Cold War Created Astrobiology», *Nautilus* (2016), nautil.us/issue/32/space/how-the-cold-war-created-astrobiology-rp [última fecha de acceso: 29 de ju- nio del 2020].

Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., Kapos, V., «Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool», *Carbon Management*, 5 (2014), pp. 81-91.

Schenkel, D., Maciá-Vicente, J. G., Bissell, A., Splivallo, R., «Fungi indirectly affect plant root architecture by modulating soil volatile organic compounds», *Frontiers in Microbiology*, 9 (2018), 1847.

Schmieder, S. S., Stanley, C. E., Rzepiela, A., Van Swaay, D., Sabotic, J., Nørrelykke, S. F., De Mello, A. J., Aebi, M., Künzler, M., «Bidirectional propagation of signals and nutrients in fungal networks via specialized hyphae», *Current Biology*, 29 (2019), pp. 217-228.

Schmull, M., Dal-Forno, M., Lücking, R., Cao, S., Clardy, J., Lawrey, J. D., «*Dictyonemahuaorani* (Agaricales: Hygrophoraceae), a new lichenized basidiomycete from Amazonian Ecuador with presumed hallucinogenic properties», *Bryologist*, 117 (2014), pp. 386-394.

Schultes, R., Hofmann, A., Rätsch, C., *Plants of the Gods: Their Sacred, Healing, and Hallucinogenic Powers*, 2ª edición (Rochester, Vermont, Healing Arts Press, 2001).

Schultes, R. E., «Teonanacatl: the narcotic mushroom of the Aztecs», *American Anthropologist*, 42 (1940), pp. 429-443.

Seaward, M., «Environmental Role of Lichens», en T. H. Nash ed., *Lichen Biology* (Cam- bridge, Cambridge University Press, 2008), pp. 274-298.

Selosse, M.-A., «Prototaxites: a 400-Myr-old giant fossil, a saprophytic holobasidiomycete, or a lichen?», *Mycological Research*, 106 (2002), pp. 641-644.

Selosse, M.-A., Schneider-Maunoury, L., Martos, F., «Time to re-think fungal ecology? Fungal ecological niches are often prejudged», *New Phytologist*, 217 (2018), pp. 968-972. Selosse, M.-A., Schneider-Maunoury, L., Taschen E., Rousset, F., Richard, F., «Black truffle, a hermaphrodite with forced unisexual behaviour», *Trends in Microbiology*, 25 (2017), pp. 784-787.

Selosse, M.-A., Strullu-Derrien, C., Martin, F. M., Kamoun, S., Kenrick, P., «Plants, fungi and oomycetes: a 400-million-year affair that shapes the biosphere», *New Phytologist*, 206 (2015), pp. 501-506.

Selosse, M.-A., Tacon, L. F., «The land flora: a phototroph-fungus partnership?», *Trends in Ecology & Evolution*, 13 (1998), pp. 15-20.

Sergeeva, N. G., Kopytina, N. I., «The first marine filamentous fungi discovered in the bottom sediments of the oxic/anoxic interface and in the bathyal zone of the Black Sea», *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 14 (2014), pp. 497-505.

Sheldrake, M., Rosenstock, N. P., Revillini, D., Olsson, P. A., Wright, S. J., Turner, B. L, «A phosphorus threshold for mycoheterotrophic plants in tropical forests», *Proceedings of the Royal Society B*, 284 (2017), 20162093.

Shepherd, V., Orlovich, D., Ashford, A., «Cell-to-cell transport via motile tubules in growing hyphae of a fungus», *Journal of Cell Science*, 105 (1993), pp. 1173-1178.

Shomrat, T., Levin, M., «An automated training paradigm reveals long-term memory in planarians and its persistence through head regeneration», *Journal of Experimental Biology*, 216 (2013), pp. 3799-3810.

Shukla, V., Joshi, G. P., Rawat, M. S. M., «Lichens as a potential natural source of bioactive compounds: a review», *Phytochemical Reviews*, 9 (2010), pp. 303-314.

Siegel, R. K., *Intoxication: The Universal Drive for Mind-Altering Substances* (Rochester, Ver- mont, Park Street Press, 2005).

Silvertown, J., «A new dawn for citizen science», *Trends in Ecology & Evolution*, 24 (2009), pp. 467-471.

Simard, S., «Mycorrhizal Networks Facilitate Tree Communication, Learning, and Memory», en F. Baluska, M. Gagliano y G. Witzany eds., *Memory and Learning in Plants* (Springer International Publishing, 2018), pp. 191-213.

Simard, S., Asay, A., Beiler, K., Bingham, M., Deslippe, J., He, X., Phillip, L., Song, Y., Teste, F., «Resource Transfer between Plants through Ectomycorrhizal Fungal Networks», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Publishing, 2015), pp. 133-176.

Simard, S. W., Beiler, K. J., Bingham, M. A., Deslippe, J. R., Philip, L. J., Teste, F. P., «Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling», *Fungal Biology Reviews*, 26 (2012), pp. 39-60.

Simard, S., Perry, D. A., Jones, M. D., Myrold, D. D., Durall, D. M., Molina, R., «Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field», *Nature*, 388 (1997), pp. 579-582.

Singh, H., *Mycoremediation* (Nueva York, John Wiley, 2006).

Slayman, C., Long, W., Gradmann, D., «“Action potentials” in *Neurospora crassa*, a mycelial fungus», *Biochimica et Biophysica Acta*, 426 (1976), pp. 732-744.

Smith, S. E., Read, D. J., *Mycorrhizal Symbiosis* (Londres, Academic Press, 2008).

Solé, R., Moses, M., Forrest, S., «Liquid brains, solid brains», *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374 (2019), 20190040.

Soliman, S., Greenwood, J. S, Bombarely, A., Muelle, L. A., Tsao, R. Mosser, D. D., Raizada, M. N., «An endophyte constructs fungicide-containing extracellular barriers for its host plant», *Current Biology*, 25 (2015), pp. 2570-2576.

Song, Y., Zeng, R., «Interplant communication of tomato plants through underground com- mon mycorrhizal networks», *PLOS ONE*, 5 (2010), e11324.

Song, Y., Simard, S. W., Carroll, A., Mohn, W. W., Zeng, R., «Defoliation of interior Douglas fir elicits carbon transfer and stress signalling to ponderosa pine neighbors through ectomycorrhizal networks», *Scientific Reports*, 5 (2015a), 8495.

Song, Y., Ye, M., Li, C., He, X., Zhu-Salzman, K., Wang, R., Su, Y., Luo, S., Zeng, R., «Hijacking common mycorrhizal networks for herbivore-induced defence signal transfer be- tween tomato plants», *Scientific Reports*, 4 (2015b), 3915.

Southworth, D., He, X.-H., Swenson, W., Bledsoe, C., Horwath, W., «Application of network theory to potential mycorrhizal networks», *Mycorrhiza*, 15 (2005), pp. 589-595.

Spanos, N. P., Gottleib, J., «Ergotism and the Salem village witch trials», *Science*, 194 (1976), pp. 1390-1394.

Splivallo, R., Novero, M., Bertea, C. M., Bossi, S., Bonfante, P., «Truffle volatiles inhibit growth and induce an oxidative burst in *Arabidopsis thaliana*», *New Phytologist*, 175 (2007), pp. 417-424.

Splivallo, R., Fischer, U., Göbel, C., Feussner, I., Karlovsky, P., «Truffles regulate plant root morphogenesis via the production of auxin and ethylene», *Plant Physiology*, 150 (2009), pp. 2018-2029.

Splivallo, R., Ottonello, S., Mello, A., Karlovsky, P., «Truffle volatiles: from chemical ecology to aroma biosynthesis», *New Phytologist*, 189 (2011), pp. 688-699.

Spribille, T., Tuovinen, V., Resl, P., Vanderpool, D., Wolinski, H., Aime, C. M., Schneider, K., Stabentheiner, E., Toome-Heller, M., Thor, G. et al., «Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens», *Science*, 353 (2016), pp. 488-492.

Spribille, T., «Relative symbiont input and the lichen symbiotic outcome», *Current Opinion in Plant Biology*, 44 (2018), pp. 57-63.

Stamets, P., *Psilocybin Mushrooms of the World* (Berkeley, California, Ten Speed Press, 1996).

Stamets, P., «Global Ecologies, World Distribution and Relative Potency of Psilocybin Mushrooms», en R. Metzner ed., *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl* (Roches- ter, Vermont, Park Street Press, 2005), pp. 69-75.

Stamets, P., *Mycelium Running* (Berkeley, California, Ten Speed Press, 2011)

Stamets, P. E., Naeger, N. L., Evans, J. D., Han, J. O., Hopkins, B. K., Lopez, D., Moershel, H. M., Nally, R., Sumerlin, D., Taylor, A. W. et al., «Extracts of polypore mushroom mycelia reduce viruses in honey bees», *Scientific Reports*, 8 (2018), 3936.

*State of the World's Fungi* (Kew, Royal Botanic Gardens, 2018), stateoftheworldsfungi.org [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Steele, E. J., Al-Mufti, S., Augustyn, K. A., Chandrajith, R., Coghlan, J. P., Coulson, S. G., Ghosh, S., Gillman, M., Gorczynski, R. M., Klyce, B. et al., «Cause of Cambrian explosion – ter- restrial or cosmic?», *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 136 (2018) pp. 3-23.

Steidinger, B., Crowther, T., Liang, J., Nuland, V. M., Werner, G., Reich, P., Nabuurs, G., De Miguel, S., Zhou, M., Picard, N. et al., «Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses», *Nature*, 569 (2019), pp. 404-408.

Steinberg, G., «Hyphal growth: a tale of motors, lipids and the *Spitzenkörper*», *Eukaryotic Cell*, 6 (2007), pp. 351-360.

Steinhardt, J. B., *Mycelium is the Message: Open Science, Ecological Values and Alternative Futures with Do-It-Yourself Mycologists,* tesis doctoral, Universidad de California en Santa Bárbara (2018).

Stierle, A., Strobel, G., Stierle, D., «Taxol and taxane production by *Taxomyces andreanae*, an endophytic fungus of Pacific yew», *Science*, 260 (1993), pp. 214-216.

Stough, J. M., Yutin, N., Chaban, Y. V., Moniruzzaman, M., Gann, E. R., Pound, H. L., Steffen, M. M., Black, J. N., Koonin, E. V., Wilhelm, S. W. et al., «Genome and environmental activity of a chrysochromulina parva virus and its virophages», *Frontiers in Microbiology*, 10 (2019), 703.

Strullu-Derrien, C., Selosse, M.-A., Kenrick, P., Martin, F. M., «The origin and evolution of mycorrhizal symbioses: from palaeomycology to phylogenomics», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 1012-1030.

Studerus, E., Kometer, M., Hasler, F., Vollenweider, F. X., «Acute, subacute and long-term subjective effects of psilocybin in healthy humans: a pooled analysis of experimen- tal studies», *Journal of Psychopharmacology*, 25 (2011), pp. 1434-1452.

Stukeley, W., *Memories of Sir Isaac Newton's Life* (1752; no publicado; disponible en el sitio web de la Royal Society: ttp.royalsociety.org/ttp/ttp.html?id=1807da00- [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Suarato, G., Bertorelli, R., Athanassiou, A., «Borrowing from nature: biopolymers and biocomposites as smart wound care materials», *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 6 (2018), 137.

Sudbery, P., Gow, N., Berman, J., «The distinct morphogenic states of *Candida albicans*», *Trends in Microbiology*, 12 (2004), pp. 317-324.

Swift, R. S., «Sequestration of carbon by soil», *Soil Science*, 166 (2001), pp. 858-871.

Taiz, L., Alkon, D., Draguhn, A., Murphy, A., Blatt, M., Hawes, C., Thiel, G., Robinson, D. G., «Plants neither possess nor require consciousness», *Trends in Plant Science*, 24(2019), pp. 677-687.

Takaki, K., Yoshida, K., Saito, T., Kusaka, T., Yamaguchi, R., Takahashi, K., Sakamoto, Y., «Effect of electrical stimulation on fruit body formation in cultivating mushrooms», *Microorganisms*, 2 (2014), pp. 58-72.

Talou, T., Gaset, A., Delmas, M., Kulifaj, M., Montant, C., «Dimethyl sulphide: the secret for black truffle hunting by animals?», *Mycological Research*, 94 (1990), pp. 277-278. Tanney, J. B., Visagie, C. M., Yilmaz, N., Seifert, K. A., «Aspergillus subgenus *Polypaecilum* from the built environment», *Studies in Mycology*, 88 (2017), pp. 237-267.

Taschen, E., Rousset, F., Sauve, M., Benoit, L., Dubois, M.-P., Richard, F., Selosse, M.-A., «How the truffle got its mate: insights from genetic structure in spontaneous and planted Mediterranean populations of *Tuber melanosporum*», *Molecular Ecology*, 25 (2016), pp. 5611-5627.

Taylor, A., Flatt, A., Beutel, M., Wolff, M., Brownson, K., Stamets, P., «Removal of *Escherichia coli* from synthetic stormwater using mycofiltration», *Ecological Engineering*, 78 (2015), pp. 79-86.

Taylor, L., Leake, J., Quirk, J., Hardy, K., Banwart, S., Beerling, D., «Biological weathering and the long-term carbon cycle: integrating mycorrhizal evolution and function into the current paradigm», *Geobiology*, 7 (2009), pp. 171-191.

Taylor, T., Klavins, S., Krings, M., Taylor, E., Kerp, H., Hass, H., «Fungi from the Rhynie chert: a view from the dark side», *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 94 (2007), pp. 457-473.

Temple, R., «The prehistory of panspermia: astrophysical or metaphysical?», *International Journal of Astrobiology*, 6 (2007), pp. 169-180.

Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebber, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., Nakagaki, T., «Rules for biologically inspired adaptive network design», *Science*, 327 (2010), pp. 439-442.

Terrer, C., Vicca, S., Hungate, B. A., Phillips, R. P., Prentice, I. C., «Mycorrhizal association as a primary control of the CO2 fertilization effect», *Science*, 353 (2016), pp. 72-74.

Thierry, G., «Lab-grown mini brains: we can't dismiss the possibility that they could one day outsmart us», diálogo (2019), theconversation.com/lab-grown-mini-brains-wecant-dismiss-the-possibility-that-they-could-one-day-outsmart-us-125842 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Thirkell, T. J., Charters, M. D., Elliott, A. J., Sait, S. M., Field, K. J., «Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security», *Journal of Ecology*, 105 (2017), pp. 921-929.

Thirkell, T. J., Pastok, D., Field, K. J., «Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration», *Global Change Biology* (2019), DOI: 10.1111/gcb.14851.

Thomas, P., Büntgen, U., «First harvest of Périgord black truffle in the UK as a result of climate change», *Climate Research*, 74 (2017), pp. 67-70.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B. L., «Global food demand and the sustainable intensification of agriculture», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (2011), pp. 20260-20264.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., Polasky, S., «Agricultural sustainabi- lity and intensive production practices», *Nature*, 418 (2002), pp. 671-677.

Tkavc, R., Matrosova, V. Y., Grichenko, O. E., Gostincar, C., Volpe, R. P., Klimenkova, P., Gaidamakova, E. K., Zhou, C. E., Stewart, B. J., Lyman, M. G. et al., «Prospects for fungal bioremediation of acidic radioactive waste sites: characterization and genome sequence of *Rhodotorula taiwanensis* MD1149», *Frontiers in Microbiology*, 8 (2018), 2528.

Tlalka, M., Hensman, D., Darrah, P., Watkinson, S., Fricker, M. D., «Noncircadian oscillations in amino acid transport have complementary profiles in assimilatory and foraging hyphae of *Phanerochaete velutina*», *New Phytologist*, 158 (2003), pp. 325-335.

Tlalka, M., Bebber, D. P., Darrah, P. R., Watkinson, S. C., Fricker, M. D., «Emergence of self-organised oscillatory domains in fungal mycelia», *Fungal Genetics and Biology*, 44 (2007), pp. 1085-1095.

Toju, H., Guimarães, P. R., Olesen, J. M., Thompson, J. N., «Assembly of complex plant-fun- gus networks», *Nature Communications*, 5 (2014), 5273.

Toju, H., Yamamoto, S., Tanabe, A. S., Hayakawa, T., Ishii, H. S., «Network modules and hubs in plant-root fungal biomes», *Journal of the Royal Society Interface*, 13 (2016), 20151097.

Toju, H., Peay, K. G., Yamamichi, M., Narisawa, K., Hiruma, K., Naito, K., Fukuda, S., Ushio, M., Nakaoka, S., Onoda, Y. et al., «Core microbiomes for sustainable agro- ecosystems», *Nature Plants*, 4 (2018), pp. 247-257.

Toju, H., Sato, H., «Root-associated fungi shared between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal conifers in a temperate forest», *Frontiers in Microbiology*, 9 (2018), 433. Tolkien, J. R. R., *The Lord of the Rings* (Londres, Harper Collins, 2014) [en español, *El señor de los anillos*, Minotauro, 2016].

Tornberg, K., Olsson, S., «Detection of hydroxyl radicals produced by wood-decomposing fungi», *FEMS Microbiology Ecology*, 40 (2002), pp. 13-20.

Torri, L., Migliorini, P., Masoero, G., «Sensory test vs. electronic nose and/or image analysis of whole bread produced with old and modern wheat varieties adjuvanted by means of the mycorrhizal factor», *Food Research International*, 54 (2013), pp. 1400-1408.

Toyota, M., Spencer, D., Sawai-Toyota, S., Jiaqi, W., Zhang, T., Koo, A. J., Howe, G. A., Gilroy, S., «Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling», *Science*, 361 (2018), pp. 1112-1115.

Trappe, J., «Foreword», en T. Horton ed., *Mycorrhizal Networks* (Springer International Pu- blishing, 2015).

Trappe, J. M., «A. B. Frank and mycorrhizae: the challenge to evolutionary and ecologic theory»,

*Mycorrhiza*, 15 (2005), pp. 277-281.
Trewavas, A., «Response to Alpi et al.: Plant neurobiology – all metaphors have value», *Trends in Plant Science*, 12 (2007), pp. 231-233.
Trewavas, A., *Plant Behaviour and Intelligence* (Oxford, Oxford University Press, 2014).
Trewavas, A., «Intelligence, cognition, and language of green plants», *Frontiers in Psychology*, 7 (2016), 588.
Trivedi, D. K., Sinclair, E., Xu, Y., Sarkar, D., Walton-Doyle, C., Liscio, C., Banks, P., Milne, J., Silverdale, M., Kunath, T. et al., «Discovery of volatile biomarkers of Parkinson's disease from sebum», *ACS Central Science*, 5 (2019), pp. 599-606.
Tsing, A. L., *The Mushroom at the End of the World* (Princeton, New Jersey, Princeton Uni- versity Press, 2015).
Tuovinen, V., Ekman, S., Thor, G., Vanderpool, D., Spribille, T., Johannesson, H., «Two basidiomycete fungi in the cortex of wolf lichens», *Current Biology*, 29 (2019), pp. 476- 483.
Tyne, D., Manson, A. L., Huycke, M. M., Karanicolas, J., Earl, A. M., Gilmore, M. S., «Impact of antibiotic treatment and host innate immune pressure on enterococcal adaptation in the human bloodstream», *Science Translational Medicine*, 11 (2019), eaat8418.
Umehata, H., Fumagalli, M., Smail, I., Matsuda, Y., Swinbank, A. M., Cantalupo, S., Sykes, C., Ivison, R. J., Steidel, C. C., Shapley, A. E. et al., «Gas filaments of the cosmic web located around active galaxies in a protocluster», *Science*, 366 (2019), pp. 97-100.
Vadder, F., Grasset, E., Holm, L., Karsenty, G., Macpherson, A. J., Olofsson, L. E., Bäckhed, F., «Gut microbiota regulates maturation of the adult enteric nervous system via enteric serotonin networks», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (2018), pp. 6458-6463.
Vahdatzadeh, M., Deveau, A., Splivallo, R., «The role of the microbiome of truffles in aroma formation: a meta-analysis approach», *Applied and Environmental Microbiology*, 81 (2015), pp. 6946-6952.
Vajda, V., McLoughlin, S., «Fungal proliferation at the cretaceous – tertiary boundary», *Science*, 303 (2004), p. 1489.
Valles-Colomer, M., Falony, G., Darzi, Y., Tigchelaar, E., Wang, J., Tito, R. Y., Schiweck, C., Kurilshikov, A., Joossens, M., Wijmenga, C. et al., «The neuroactive potential of the human gut microbiota in quality of life and depression», *Nature Microbiology* (2019), pp. 623-632.
Van Delft, F. C., Ipolitti, G., Nicolau, D. V., Perumal, A., Kašpar, O., Kheireddine, S., Wachsmann-Hogiu, S., Nicolau, D. V., «Something has to give: scaling combinatorial computing by biological agents exploring physical networks encoding NP-complete problems», *Journal of the Royal Society Interface Focus*, 8 (2018), 20180034.
Van der Heijden, M. G., Bardgett, R. D., Straalen, N. M., «The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems», *Ecology Letters*, 11 (2008), pp. 296-310.
Van der Heijden, M. G., Horton, T. R., «Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems», *Journal of Ecology*, 97 (2009), pp. 1139-1150.
Van der Heijden, M. G., Walder, F., «Reply to "Misconceptions on the application of biolo- gical market theory to the mycorrhizal symbiosis"», *Nature Plants*, 2 (2016), 16062.
Van der Heijden, M. G., «Underground networking», *Science*, 352 (2016), pp. 290-291.
Van der Heijden, M. G., Dombrowski, N., Schlaeppi, K., «Continuum of root-fungal symbioses for plant nutrition», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (2017), pp. 11574-11576.
Van der Linde, S., Suz, L. M., Orme, D. C., Cox, F., Andreae, H., Asi, E., Atkinson, B., Benham, S., Carroll, C., Cools, N. et al., «Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi», *Nature*, 558 (2018), pp. 243-248.
Van Tyne, D., Manson, A. L., Huycke, M. M., Karanicolas, J., Earl, A. M., Gilmore, M. S., «Impact of antibiotic treatment and host innate immune pressure on enterococcal adaptation in the human bloodstream», *Science Translational Medicine*, 487 (2019), eaat8418.
Vannini, C., Carpentieri, A., Salvioli, A., Novero, M., Marsoni, M., Testa, L., Pinto, M., Amoresano, A., Ortolani, F., Bracale, M. et al., «An interdomain network: the endobacterium of a mycorrhizal fungus

promotes antioxidative responses in both fungal and plant hosts», *New Phytologist*, 211 (2016), pp. 265-275.

Venner, S., Feschotte, C., Biémont, C., «Dynamics of transposable elements: towards a com- munity ecology of the genome», *Trends in Genetics*, 25 (2009), pp. 317-323.

Verbruggen, E., Röling, W. F., Gamper, H. A., Kowalchuk, G. A., Verhoef, H. A., Van der Heijden, M. G., «Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils», *New Phytologist*, 186 (2010), pp. 968-979.

Vetter, W., Roberts, D., «Revisiting the organohalogens associated with 1979-samples of Brazilian bees *(Eufriesea purpurata)*», *Science of the Total Environment*, 377 (2007), pp. 371-377.

Vita, F., Taiti, C., Pompeiano, A., Bazihizina, N., Lucarotti, V., Mancuso, S., Alpi, A., «Volatile organic compounds in truffle (*Tuber magnatum* Pico): comparison of samples from different regions of Italy and from different seasons», *Scientific Reports*, 5 (2015), 12629.

Viveiros de Castro, E., «Exchanging perspectives: the transformation of objects into sub- jects in a merindian ontologies», *Common Knowledge* (2004), pp. 463-484.

Von Bertalanffy, L., *Modern Theories of Development: An Introduction to Theoretical Biology* (Londres, Humphrey Milford, 1933).

Von Humboldt, A., *Kosmos: Entwurf einer physischen Weltbeschreibung* (Stuttgart & Tübingen, J. G. Cotta'schen Buchhandlungen, 1845) archive.org/details/b29329693_0001 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Von Humboldt, A., *Cosmos: A Sketch of Physical Description of the Universe* (Londres, Henry G. Bohn, 1849).

Wadley, G., Hayden, B., «Pharmacological influences on the Neolithic Transition», *Journal of Ethnobiology*, 35 (2015), pp. 566-584.

Wagg, C., Bender, F. S., Widmer, F., Van der Heijden, M. G., «Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (2014), pp. 5266-5270.

Wainwright, M., «Moulds in Folk Medicine», *Folklore*, 100 (1989a), pp. 162-166.

Wainwright, M., «Moulds in ancient and more recent medicine», *Mycologist*, 3 (1989b), pp. 21-23.

Wainwright, M., Rally, L., Ali, T., «The scientific basis of mould therapy», *Mycologist*, 6 (1992), pp. 108-110.

Walder, F., Niemann, H., Natarajan, M., Lehmann, M. F., Boller, T., Wiemken, A., «Mycorrhizal networks: common goods of plants shared under unequal terms of trade», *Plant Physiology*, 159 (2012), pp. 789-797.

Walder, F., Van der Heijden, M. G., «Regulation of resource exchange in the arbuscular my- corrhizal symbiosis», *Nature Plants*, 1 (2015), 15159.

Waller, L. P., Felten, J., Hiiesalu, I., Vogt-Schilb, H., «Sharing resources for mutual benefit: crosstalk between disciplines deepens the understanding of mycorrhizal symbioses across scales», *New Phytologist*, 217 (2018), pp. 29-32.

Wang, B., Yeun, L., Xue, J., Liu, Y., Ané, J., Qiu, Y., «Presence of three mycorrhizal genes in the common ancestor of land plants suggests a key role of mycorrhizas in the coloni- sation of land by plants», *New Phytologist*, 186 (2010), pp. 514-525.

Wasson, G., Kramrisch, S., Ott, J., Ruck, C., *Persephone's Quest: Entheogens and the Origins of Religion* (New Haven, Connecticut, Yale University Press, 1986).

Wasson, G., Hofmann, A., Ruck, C., *The Road to Eleusis: Unveiling the Secret of the Mysteries* (Berkeley, California, North Atlantic Books, 2009).

Wasson, V. P., Wasson, G., *Mushrooms, Russia and History* (Nueva York, Pantheon, 1957).

Watanabe, S., Tero, A., Takamatsu, A., Nakagaki, T., «Traffic optimisation in railroad networks using an algorithm mimicking an amoeba-like organism, *Physarum plasmodium*», *Biosystems*, 105 (2011), pp. 225-232.

Watkinson, S. C., Boddy, L., Money, N., *The Fungi* (Londres, Academic Press, 2015). Watts, J., «Scientists

identify vast underground ecosystem containing billions of micro-organisms», *Guardian* (2018), www.theguardian.com/science/2018/dec/10/tread-softly-because-you-tread-on-23bn-tonnes-of-micro-organisms [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Watts-Williams, S. J., Cavagnaro, T. R., «Nutrient interactions and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of a mycorrhiza-defective mutant and wild-type tomato genotype pair», *Plant and Soil*, 384 (2014), pp. 79-92.

Wellman, C. H., Strother, P. K., «The terrestrial biota prior to the origin of land plants (em- bryophytes): a review of the evidence», *Palaeontology*, 58 (2015), pp. 601-627.

Weremijewicz, Janos, D. P., «Common mycorrhizal networks amplify competition by preferential mineral nutrient allocation to large host plants», *New Phytologist*, 212 (2016), pp. 461-471.

Werner, G. D., Kiers, T. E., «Partner selection in the mycorrhizal mutualism», *New Phytologist*, 205 (2015), pp. 1437-1442.

Werner, G. D., Strassmann, J. E., Ivens, A. B., Engelmoer, D. J., Verbruggen, E., Queller, D. C., Noë, R., Johnson, N., Hammerstein, P., Kiers, T. E., «Evolution of microbial markets», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 11 (2014), pp. 1237-1244.

Werrett, S., *Thrifty Science: Making the Most of Materials in the History of Experiment* (Chica- go, University of Chicago Press, 2019).

West, M., «Putting the "I" in science», *Nature* (2019), www.nature.com/articles/d41586-019-03051-z [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Westerhoff, H. V., Brooks, A. N., Simeonidis, E., García-Contreras, R., He, F., Boogerd, F. C., Jackson, V. J., Goncharuk, V., Kolodkin, A., «Macromolecular networks and intelli- gence in microorganisms», *Frontiers in Microbiology*, 5 (2014), 379.

Weyrich, L. S., Duchene, S., Soubrier, J., Arriola, L., Llamas, B., Breen, J., Morris, A. G., Alt, K. W., Caramelli, D., Dresely, V. et al., «Neanderthal behaviour, diet and disease inferred from ancient DNA in dental calculus», *Nature*, 544 (2017), pp. 357-361.

Whiteside, M. D., Werner, G. D. A., Caldas, V. E. A., Van't Padje, A., Dupin, S. E., Elbers, B., Bakker, M., Wyatt, G. A. K., Klein, M., Hink, M. A. et al., «Mycorrhizal fungi respond to resource inequality by moving phosphorus from rich to poor patches across networks», *Current Biology*, 29 (2019), pp. 2043-2050.

Whittaker, R., «New concepts of kingdoms of organisms», *Science*, 163 (1969), pp. 150-160.

Wiens, F., Zitzmann, A., Lachance, M.-A., Yegles, M., Pragst, F., Wurst, F. M., Von Holst, D., Guan, S., Spanagel, R., «Chronic intake of fermented floral nectar by wild treeshrews», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (2008), pp. 10426-10431.

Wilkinson, D. M., «The evolutionary ecology of mycorrhizal networks», *Oikos*, 82 (1998), pp. 407-410.

Willerslev, R., *Soul Hunters: Hunting, Animsim, and Personhood among the Siberian Yukaghirs* (Berkeley, University of California Press, 2007).

Wilson, G. W., Rice, C. W., Rillig, M. C., Springer, A., Hartnett, D. C., «Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments», *Ecology Letters*, 12 (2009), pp. 452-461.

Winkelman, M. J., «The mechanisms of psychedelic visionary experiences: hypotheses from evolutionary psychology», *Frontiers in Neuroscience*, 11 (2017), 539.

Wipf, D., Krajinski, F., Tuinen, D., Recorbet, G., Courty, P., «Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks», *New Phytologist*, 223 (2019), pp. 1127-1142.

Wisecaver, J. H., Slot, J. C., Rokas, A., «The evolution of fungal metabolic pathways», *PLOS Genetics*, 10 (2014), e1004816.

Witt, P., «Drugs alter web-building of spiders: a review and evaluation», *Behavioral Science*, 16 (1971), pp. 98-113.

Wolfe, B. E., Husband, B. C., Klironomos, J. N., «Effects of a belowground mutualism on an aboveground mutualism», *Ecology Letters*, 8 (2005), pp. 218-223.

Wright, C. K., Wimberly, M. C., «Recent land use change in the Western Corn Belt threatens grasslands and wetlands», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (2013), pp. 4134-4139.

Wulf, A., *The Invention of Nature* (Nueva York, Alfred A. Knopf, 2015).

Wyatt, G. A., Kiers, T. E., Gardner, A., West, S. A., «A biological market analysis of the plant-mycorrhizal symbiosis», *Evolution*, 68 (2014), pp. 2603-2618.

Yano, J. M., Yu, K., Donaldson, G. P., Shastri, G. G., Ann, P., Ma, L., Nagler, C. R., Ismagilov, R. F., Masmanian, S. K., Hsiao, E. Y., «Indigenous bacteria from the gut microbiota regulate host serotonin biosynthesis», *Cell*, 161 (2015), pp. 264-276.

Yon, D., «Now You See It», *Quanta* (2019), aeon.co/essays/how-our-brain-sculpts-experience-in-line-with-our-expectations? [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]. Yong, E., «The Guts That Scrape the Skies», *National Geographic* (2014), www.nationalgeographic.com/science/phenomena/2014/09/23/the-guts-that-scrape-the-skies/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Yong, E., *I Contain Multitudes: The Microbes Within Us and a Grander View of Life* (Nueva York, Ecco Press, 2016).

Yong, E., «How the Zombie Fungus Takes Over Ants' Bodies to Control Their Minds», *Atlantic* (2017), www.theatlantic.com/science/archive/2017/11/how-the-zombiefungus-takes-over-ants-bodies-to-control-their-minds/545864/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Yong, E., «This Parasite Drugs Its Hosts with the Psychedelic Chemical in Shrooms», *Atlantic* (2018), www.theatlantic.com/science/archive/2018/07/massospora-para-site-drugs-its-hosts/566324/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Yong, E., «The Worst Disease Ever Recorded», *Atlantic* (2019), www.theatlantic.com/science/archive/2019/03/bd-frogs-apocalypse-disease/585862/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

Young, R. M., *Darwin's Metaphor* (Cambridge, Cambridge University Press, 1985). Yuan, X., Xiao, S., Taylor, T. N., «Lichen-like symbiosis 600 million years ago», *Science*, 308 (2005), pp. 1017-1020.

Yun-Chang, W., «Mycology in Ancient China», *Mycologist*, 1 (1985), pp. 59-61.

Zabinski, C. A., Bunn, R. A., «Function of Mycorrhizae in Extreme Environments», en Z. Solaiman, L. Abbott y A. Varma eds., *Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration* (Springer International Publishing, 2014), pp. 201-214. Zhang, M. M., Poulsen, M., Currie, C. R., «Symbiont recognition of mutualistic bacteria by *Acromyrmex* leaf-cutting ants», *ISME Journal*, 1 (2007), pp. 313-320.

Zhang, S., Lehmann, A., Zheng, W., You, Z., Rillig, M. C., «Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta-analysis», *New Phytologist*, 222 (2019), pp. 543-555.

Zhang, Y., Kastman, E. K., Guasto, J. S., Wolfe, B. E., «Fungal networks shape dynamics of bacterial dispersal and community assembly in cheese rind microbiomes», *Nature Communications*, 9 (2018), 336.

Zheng, C., Ji, B., Zhang, J., Zhang, F., Bever, J. D., «Shading decreases plant carbon preferential allocation towards the most beneficial mycorrhizal mutualist», *New Phytologist*, 205 (2015), pp. 361-368.

Zheng, P., Zeng, B., Zhou, C., Liu, M., Fang, Z., Xu, X., Zeng, L., Chen, J., Fan, S., Du, X. et al., «Gut microbiome remodeling induces depressive-like behaviors through a pathway mediated by the host's metabolism», *MolecularPsychiatry*, 21 (2016), pp. 786-796.

Zhu, K., McCormack, L. M., Lankau, R. A., Egan, F. J., Wurzburger, N., «Association of ectomycorrhizal trees with high carbon-to-nitrogen ratio soils across temperate forests is driven by smaller nitrogen not larger carbon stocks», *Journal of Ecology*, 106 (2018), pp. 524-535.

Zhu, L., Aono, M., Kim, S.-J., Hara, M., «Amoeba-based computing for traveling salesman problem: Long-term correlations between spatially separated individual cells of *Physarum polycephalum*», *Biosystems*, 12 (2013), pp. 1-10.

Zobel, M., «Eltonian niche width determines range expansion success in ectomycorrhizal conifers», *New Phytologist*, 220 (2018), pp. 947-949.



# Notas

1. Ferguson et al., 2003. Hay muchos más estudios sobre enormes redes de *Armillaria*. Uno publicado por Anderson et al. (2018) investigó una red de micelios en Míchigan de 2500 años (aprox.) y un peso de 400 toneladas (mín.), que ocupaba una superficie de 75 ha. Los investigadores descubrieron que el hongo tenía un índice extremadamente bajo de mutación genética, dando a entender que tiene una manera de protegerse a sí mismo de daños en su ADN. No se sabe con exactitud cómo el hongo puede conservar semejante genoma estable, pero quizá esto ayude a explicar su capacidad para vivir tantos años. Además del *Armillaria*, también hay otros organismos muy grandes como las hierbas marinas clónicas (Arnaud-Haond et al., 2012).

2. Moore et al. (2011), cap. 2.7; Honegger et al. (2018). Se han descubierto restos fosilizados de *Prototaxites* en Norteamérica, Europa, África, Asia y Australia. Los biólogos llevan desde mediados del siglo XIX rebanándose los sesos para saber lo que eran los *Prototaxites*. Al principio se creía que era un árbol podrido. Poco después, ascendió al estatus de alga marina gigante, pese a la prueba aplastante de que crecía en tierra. En el 2001, tras décadas de discusiones, se concluyó que los *Prototaxites* eran en realidad los cuerpos fructíferos de un hongo. Es un argumento convincente: los *Prototaxites* se formaron a partir de filamentos densamente entrelazados que parecen más una hifa fúngica que otra cosa. Los análisis de los isótopos de carbono indican que sobrevivían por la ingesta de su entorno inmediato y no por la fotosíntesis. Más recientemente, Selosse (2002) ha argumentado que es más plausible que los *Prototaxites* fueran estructuras gigantes similares a los líquenes, formadas por la unión de hongos con algas fotosintéticas. Argumenta que los *Prototaxites* eran demasiado grandes para autoabastecerse con plantas en descomposición. Si los *Prototaxites* eran parcialmente fotosintéticos, podían complementar su dieta de plantas muertas con la energía de la fotosíntesis. Tendrían los medios y el incentivo para crecer hasta convertirse en las estructuras más altas de su entorno. Y es más, los *Prototaxites*contenían resistentes polímeros que se hallaban en las algas de esa época, insinuando que las células de las algas vivían entrelazadas con las hifas de los hongos. La hipótesis de los líquenes también ayuda a explicar por qué se extinguieron. Tras 40 millones de años de dominancia en el planeta, los *Prototaxites* murieron misteriosamente al mismo tiempo que las plantas evolucionaban hasta ser árboles y matorrales. Dicha observación encaja con que los *Prototaxites*eran organismos similares a los líquenes, porque a mayor número de plantas, menos luz.

3. Para una exposición amplia de la diversidad y distribución de los hongos, véase Peay (2016); para hongos marinos, véase Bass et al. (2007); para hongos endófitos, véase Mejía et al. (2014), Arnold et al. (2003) y Rodríguez et al. (2009). Para información sobre los hongos concretos de las destilerías, donde progresan en los efluvios de alcohol que se evaporan de las barricas de *whisky* cuando envejece, véase Alpert (2011).

4. Para hongos que comen piedra, véase Burford et al. (2003) y Quirk et al. (2014); para los que comen plásticos y TNT, véase Peay et al. (2016), Harms et al. (2011), Stamets (2011) y Khan et al. (2017); para hongos resistentes a la radioactividad, véase Tkavc et al. (2018); para hongos radiográficos, véase Dadachova y Casadevall (2008) y Casadevall et al. (2017).

5. Para expulsión de esporas, véase Money (1998), Money (2016) y Dressaire et al. (2016). Para masa de esporas e influencia en el clima, véase Fröhlich-Nowoisky et al. (2009). Para un repaso a las muchas soluciones que los hongos se han ingeniado en respuesta a los problemas de la dispersión de esporas, véase Roper et al. (2010) y Roper y Seminara (2017).

6. Para flujo, véase Roper y Seminara (2017); para impulsos eléctricos, véase Harold et al. (1985), Olsson y Hansson (1995). Los hongos levaduriformes constituyen aprox. el 1% del reino de los hongos y se multiplican por «germinación» o fragmentación. Algunas levaduras pueden formar estructuras de hifas en determinadas condiciones (Sudbery et al., 2004).

7. Para información sobre hongos que atraviesan el asfalto y levantan adoquines, véase Moore (2013b), cap. 3.

8. Las hormigas cortadoras de hojas no solo alimentan y cobijan a sus hongos: también los medican. Los huertos fúngicos de dichas hormigas son monocultivos, o sea, de un solo tipo de hongo. Como pasa en los monocultivos de los seres humanos, los hongos son vulnerables. Especialmente peligroso es un tipo de hongo parasitario que puede destruir un huerto fúngico. Las hormigas cortadoras de hojas portan bacterias en elaboradas cámaras de sus cutículas, alimentadas por glándulas específicas. Cada hormiguero cultiva su propia cepa de bacterias, reconocida y favorecida por las hormigas por encima de otras cepas, aunque estén íntimamente relacionadas. Estas bacterias domesticadas producen antibióticos que inhiben potentemente el hongo parasitario y estimulan el crecimiento de los cultivados. Sin estos hongos, las colonias de hormigas cortadoras de hojas no alcanzarían semejante tamaño. Véase Currie et al. (1999), Currie et al. (2006) y Zhang et al. (2007).

9. Para la diosa romana Robigus, véase Money (2007), cap. 6, y Kavaler (1967), cap. 1. Para superbacterias fúngicas, véase Fisher et al. (2012, 2018), Casadevall et al. (2019) y Engelthaler et al. (2019); para enfermedades de anfibios causadas por hongos, véase Yong (2019); para enfermedades de las bananas, véase Maxman (2019). Entre los animales, las enfermedades causadas por bacterias suponen una amenaza mayor que las causadas por hongos. En cambio, entre plantas, las enfermedades causadas por hongos son una mayor amenaza que las causadas por bacterias. Es un patrón que rige en la enfermedad y en la salud: los microbiomas animales suelen estar dominados por bacterias, y los de las plantas por hongos. Esto no quiere decir que los animales no sufran enfermedades provocadas por hongos. Las hipótesis de Casadevall (2012) indican que el aumento de mamíferos y el declive de reptiles que siguió al suceso que acabó con los dinosaurios –la extinción del Cretácico-Terciario (K-T)– se debió a la capacidad de los mamíferos para combatir las enfermedades fúngicas. Los mamíferos, comparados a los reptiles, tenían algunas desventajas: los animales de sangre caliente gastan más energía, también para producir leche y dar cuidados parentales intensivos. Pero puede ser que las elevadas temperaturas corporales de los mamíferos fueran exactamente las que permitieron el reemplazo de los reptiles como animales terrestres dominantes. Estas elevadas temperaturas corporales de los mamíferos ayudan a impedir el aumento de hongos patógenos que se ha conjeturado que han proliferado en la «pila de compost global» que siguió a la masiva muerte regresiva de los bosques durante la extinción K-T. Hasta la fecha, los mamíferos son más resistentes a las enfermedades fúngicas comunes que los reptiles o anfibios.

10. Para estudiar a los neandertales, véase Weyrich et al. (2017); para el Hombre de Hielo, véase Peintner et al. (1998). No se puede saber a ciencia cierta para qué utilizaba el yesquero del abedul *(Fomitopsis betulina)* el Hombre de Hielo, pero son amargos y correosos, o sea, nada 'nutritivos' en el sentido convencional. El cuidado atavío de estos hongos por parte del Hombre de Hielo –que venían montados como llaveros en correas de cuero– indica que era consciente de su valor y utilidad.

11. Para remedios con moho, véase Wainwright (1989 a y b). Los restos humanos de yacimientos arqueológicos de Egipto, Sudán y Jordania datan del año 400 d.C. y contienen altos índices de antibiótico tetraciclina en sus huesos, que indican un consumo prolongado, y seguramente terapéutico. La tetraciclina la produce una bacteria, no un hongo, pero su fuente probable eran los cereales enmohecidos, utilizados probablemente para hacer cerveza medicinal (Bassett et al., 1980, Nelson et al., 2010). La trayectoria desde la primera anotación de Fleming hasta el salto de la penicilina a la palestra internacional no fue un camino de rosas y requirió muchísimo esfuerzo humano: experimentos, planificación industrial, apoyo político. Para empezar, Fleming lo tuvo difícil para convencer a alguien para que se interesara por su descubrimiento. En palabras de Milton Wainwright, un microbiólogo e historiador de ciencia, Fleming era un excéntrico que «mareaba la perdiz. Tenía fama de ser un chalado y de hacer tonterías, como crear un retrato de la reina en una placa de Petri con diferentes cultivos de bacterias». La prueba definitiva del valor terapéutico de la penicilina no llegó hasta 12 años después de las primeras anotaciones de Fleming. En la década de 1930, un grupo de investigación de Oxford desarrolló un método para extraer y purificar la penicilina, y en 1940 dirigió ensayos que demostraron su increíble capacidad para combatir infecciones. Sin embargo, la penicilina no era fácil de producir. A falta de un producto disponible a nivel global, se publicaron instrucciones de cómo cultivar el hongo en las publicaciones médicas. Algunos médicos utilizaron extractos de baja calidad sin pulir, junto con micelio picado en gasa quirúrgica –«cojines de micelio»– para tratar infecciones, que resultaron ser efectivos (Wainwright, 1989 a y b). Fue en Estados Unidos donde se industrializó la producción de penicilina. Esto se debió, por un lado, a los métodos avanzados estadounidenses por cultivar hongos en fermentadoras industriales, y por el otro, al descubrimiento de cepas altamente rentables de hongo*Penicillium*; cepas que fueron mejoradas notablemente por rondas de mutación. La industrialización de la penicilina condujo a un esfuerzo extraordinario para investigar antibióticos nuevos, y miles de hongos y bacterias fueron analizados.

12. Para fármacos, véase Linnakoski et al. (2018), Aly et al. (2011) y Gond et al. (2014). Para psilocibina, véase Carhart-Harris et al. (2016a), Griffiths et al. (2016) y Ross et al. (2016). Para vacunas y ácido cítrico, véase el *State of the World's Fungi* (2018). Para mercado de setas comestibles y medicinales, véase www.knowledge-sourcing.com/report/global-edible-mushrooms-market [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]. En 1993, un estudio publicado en la revista *Science* informaba que el paclitaxel (comercializado con la marca Taxol) se elaboraba a partir de un hongo endófito aislado de la corteza del tejo del Pacífico *(Taxus brevifolia)* (Stierle et al., 1993). Posteriormente se desveló que el paclitaxel se producía por más hongos que plantas –por unos 200 hongos endófitos, diseminados por varias familias de hongos (Kusari et al. 2014)–. Un fulminante fungicida que desempeña un potente papel defensivo: los hongos que pueden producir paclitaxel también pueden detener otros hongos. Actúa contra los hongos de la misma manera que lucha contra el cáncer, impidiendo la división de células. Los hongos que producen paclitaxel son inmunes a sus efectos, como otros endófitos fúngicos del tejo (Soliman et al., 2015). Hay otras medicinas fúngicas anticancerígenas que se utilizan en la farmacia convencional. Se ha descubierto que el Lentinan, un polisacárido que se extrae de las setas *shiitake*, estimula la capacidad del sistema inmunitario para luchar con el cáncer, y está médicamente aprobado en Japón para el tratamiento de cánceres de estómago y de pecho (Rogers, 2012). El PSK, un compuesto aislado de *Coriolusversicolor*, alarga la supervivencia de pacientes que sufren varios tipos de cáncer y se utiliza como complemento a tratamientos convencionales de cáncer en China y Japón (Powell, 2014).

13. Para melaninas fúngicas, véase Cordero (2017).

14. Para estimaciones del número de especies de hongos, véase Hawksworth (2001) y Hawksworth y Lücking (2017).

15. En neurociencia, la intervención de nuestras expectativas en la percepción se conoce como influencia de arriba abajo o, a veces, inferencia bayesiana (por Thomas Bayes, un matemático que hizo una contribución pionera en las matemáticas de la probabilidad, o «doctrina de probabilidades»). Véase Gilbert y Sigman (2007) y Mazzucato et al. (2019).

16. Adamatzky (2016); Latty and Beekman (2011); Nakagaki et al. (2000); Bonifaci et al. (2012); Tero et al. (2010), Oettmeier et al. (2017). En *Advances in Physarum Machines*, los investigadores detallan muchas propiedades sorprendentes de los mohos mucilaginosos. Algunos utilizan estos mohos mucilaginosos para hacer puertas de decisión y osciladores, otros simulan migraciones humanas históricas y posibles patrones futuribles de migraciones humanas en la Luna. Los modelos matemáticos inspirados por mohos mucilaginosos incluyen una implementación no cuántica del algoritmo de Shor, el cálculo de los caminos más cortos y el diseño de cadenas de suministro (Adamatzky 2016). Oettmeier et al. (2017) destaca que Hirohito, emperador de Japón de 1926 a 1989, estaba tan fascinado por los mohos mucilaginosos que, en 1935, publicó un libro sobre el tema. Desde entonces, los mohos mucilaginosos han sido un tema de investigación que da prestigio en Japón.

17. El sistema de clasificación concebido por Carl Linnaeus y publicado en su *Systema Naturae* en 1735, una versión modificada de la que se utiliza hoy, extrapoló esta jerarquía a las razas humanas. Encabezando la tabla de la liga humana estaban los europeos: «Muy inteligentes, ingeniosos. Ataviados con ropas ajustadas. Gobernados por la ley». Después, los americanos: «Gobernados por las costumbres». Les seguían los asiáticos: «Gobernados por la opinión». Y luego, los africanos: «Flojos, perezosos... maliciosos, lentos, descuidados. Empapados en sudor. Gobernados por el capricho» (Kendi, 2017). La forma como los sistemas de clasificación jerárquica ordenan diferentes especies se pueden ver, por extensión, como un racismo de especies.

18. Para diferentes comunidades microbianas en distintas partes del cuerpo, véase Costello et al. (2009) y Ross et al. (2018). Para una comparación con las estrellas del firmamento, véase Yong (2016), cap. 1. W. H. Auden, en su «Carta de Año Nuevo», ofrece los ecosistemas de su cuerpo a sus habitantes microbianos:

> Para criaturas de vuestro tamaño os ofrezco
> un hábitat a elegir
> para que os instaléis en la zona
> que más os plazca, en las pozas
> de mis poros, o en los bosques
> tropicales de la axila y entrepierna,
> en los desiertos de mis brazos
> o en los bosques fríos de mi cuero cabelludo.

19. Para trasplantes de órganos y cultivos de células humanas, véase Ball (2019). Para estimaciones del tamaño de nuestro microbioma, véase Bordenstein y Theis. (2015). Para virus dentro de otros virus, véase Stough et al. (2019). Para una introducción general al microbioma, véase Yong (2016), y una edición especial de *Nature* sobre el microbioma humano (mayo de 2019): www.nature.com/collections/fiabfcjbfj [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

20. En cierto sentido, todos los biólogos ahora son ecologistas –pero los ecólogos estrictos tienen una ventaja, y sus métodos empiezan a calar en nuevos territorios: un buen número de biólogos está empezando a exigir que se apliquen métodos ecológicos en campos de la biología que históricamente no son ecológicos–. Véase Gilbert y Lynch (2019), y Venner et al. (2009). Hay varios ejemplos de las repercusiones de los microbios que viven dentro de hongos. Un estudio publicado por Márquez et al. (2007) en la revista *Science* describía «un virus en un hongo en una planta». La planta –una hierba tropical– crece por naturaleza en suelos a temperaturas altas. Pero sin un hongo auxiliar que crece en sus hojas, la hierba no puede sobrevivir a altas temperaturas. Cuando el hongo crece solo, sin la planta, no le va mejor y es incapaz de sobrevivir. Sin embargo, después de todo, resulta que no es el hongo el que le confiere la capacidad de sobrevivir a temperaturas altas. Más bien es un virus que vive dentro del hongo el que le permite tolerar el calor. Cuando crece sin el virus, ni el hongo ni la planta pueden sobrevivir a altas temperaturas. Dicho de otra manera, el microbioma del hongo determina el papel que desempeña el hongo en el microbioma de la planta. El resultado está claro: vida o muerte. Uno de los ejemplos más espectaculares de microbios que viven en otros microbios es el temido hongo del tizón del arroz *(Rhizopus microsporus)*. Las toxinas clave producidas por el *Rhizopus* en realidad las produce una bacteria que habita en sus hifas. En un espectacular indicio de cómo pueden entrelazarse los destinos de los hongos y de sus bacterias asociadas, los *Rhizopus* necesitan la bacteria no solo para enfermarlos sino también para producir esporas. El *Rhizopus* experimentalmente ‘curador’ de sus residentes bacterianos impide la capacidad del hongo para reproducirse. La bacteria es la responsable de los elementos más importantes del estilo de vida del *Rhizopus,* desde su dieta a sus hábitos sexuales. Véase Araldi-Brondolo et al. (2017), Mondo et al. (2017) y Deveau et al. (2018).

21. Como observación de la pérdida del autoconcepto, véase Relman (2008). Las cuestiones de si los seres humanos son singulares o plurales no son nuevas. En fisiología del siglo XIX, se creía que los cuerpos de organismos multicelulares estaban formados por una comunidad de células, siendo cada célula un individuo *per se*, como si fuera un ser humano individual en un Estado-nación. Estas preguntas se complican por las novedades en la microbiología, porque la multitud de células del cuerpo no están estrictamente relacionadas entre sí, como, por ejemplo, estaría relacionada una célula normal del hígado con una célula normal del riñón. Véase Ball (2019), cap. 1.

1. Las trufas psicoactivas que venden en Ámsterdam no son, como sugiere su nombre, cuerpos fructíferos. Son órganos de almacenamiento conocidos como «esclerocios», a los que se llama trufas por su semejanza superficial.

2. Para un billón de olores, véase Bushdid et al. (2014); para orientación olfativa, véase Jacobs et al. (2015); para *flashbacks* olfativos y exposición general de las capacidades olfativas humanas, véase McGann (2017). Algunos seres humanos están clasificados como «súper olfateadores» o individuos hiperósmicos. Un estudio publicado por Trivedi et al. (2019) informaba que un «súper olfateador» era capaz de detectar la enfermedad del Párkinson solo con su olfato.

3. Para información sobre el olfato de diferentes vínculos químicos, véase Burr (2012), cap. 2.

4. Estos receptores pertenecen a una gran familia de receptores acoplados a la proteína G. Para un estudio de la sensibilidad olfativa humana, véase Sarrafchi et al. (2013), que asegura que los seres humanos podemos detectar algunos olores en concentraciones de 0,0001 partes por billón.

5. Para turmas de tierra, véase Ott (2002). Las trufas, según Aristóteles, eran «unafruta dedicada a Afrodita». Tienen fama de haber sido utilizadas como afrodisíacos por Napoleón y el Marqués de Sade, y George Sand las describió como «la manzana del amor de la magia negra». El gastrónomo francés Jean Anthelme Brillat-Savarin documentó que «las trufas conducen al placer erótico». En la década de 1820, se dispuso a investigar esta creencia extendida y se embarcó en una serie de reuniones con mujeres («todas las respuestas que obtuve fueron irónicas o evasivas»), y hombres («a quienes por su profesión consideraba dignos de especial confianza»). Concluyó que «la trufa no es un verdadero afrodisíaco pero, en determinadas circunstancias, puede hacer que las mujeres sean más cariñosas y los hombres, más atentos» (Hall et al., 2007, p. 33).

6. Para Laurent Rambaud, véase Chrisafis (2010). El reportero Ryan Jacobs documenta el juego sucio que impera en toda la línea de abastecimiento de trufas. Algunos envenenadores utilizan albóndigas de carne adulteradas con estricnina, otros envenenan pozas de agua en el bosque para perjudicar hasta los perros con bozal, hay quien utiliza carne con cristales incrustados, e incluso otros usan veneno para ratas o anticongelante. Según informes de veterinarios, hay que curar a centenares de perros durante la temporada de trufas. Las autoridades han tenido que valerse de perros detectores de veneno para patrullar algunos bosques (Jacobs, 2019, pp. 130-134). En el 2003, *The Guardian*publicó que a Michel Tournayre, un francés experto en trufas, le habían robado su perra trufera. Tournayre sospechaba que los ladrones no la habían vendido sino que la estaban utilizando para robar trufas de tierras ajenas (Hall et al., 2007, p. 209) ¿Hay mejor forma de robar trufas que con un perro robado?

7. Para alces con el hocico ensangrentado, véase Tsing (2015), cap. *Interlude. Smelling*; para orquídeas polinizadas por moscas, véase Policha et al. (2016); para abejas de las orquídeas que recogen complejos compuestos aromáticos, véase Vetter y Roberts (2007); para similitud con complejos producidos por hongos, véase De Jong et al. (1994). Las abejas de las orquídeas segregan una sustancia grasa que aplican al objeto perfumado. Una vez la grasa ha absorbido el perfume, la raspan para recuperarla y la almacenan en receptáculos de sus patas traseras. Este tratamiento es idéntico en principio al *enfleurage*, el método empleado durante siglos por perfumistas para capturar fragancias como el jazmín que son demasiado delicados para extraerlas con calor (Eltz et al., 2007).

8. Naef (2011).

9. Para De Bordeu, véase Corbin (1986), p. 35.

10. Para trufas que ostentan récords, véase: news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/7123414.stm [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

11. Para información sobre el papel que desempeña el microbioma de la trufa en la producción de aroma, véase Vahdatzadeh et al. (2015). Cuando salí con Daniele y Paride vi que una trufa extraída del suelo limoso cerca de un río olía bastante diferente a la encontrada en un suelo más rico en arcilla río arriba. A una musaraña hambrienta estas diferencias le dan igual. Pero una trufa blanca hallada en Alba es cuatro veces más cara que una encontrada cerca de Bolonia (aunque el hecho de que algunos comerciantes de trufa hacen pasar con cierta regularidad una trufa de Bolonia por una de Alba daría a entender que no todo el mundo sabe diferenciarlas). Las diferencias de perfiles volátiles de las trufas en cada región han sido confirmadas en estudios formales (Vita et al., 2015).

12. Para el primer informe que decía que las trufas producen androstenol, véase Claus et al. (1981); para un estudio posterior, nueve años más tarde, véase Talou et al. (1990).

13. El número de volátiles producido por una sola especie de trufas no ha parado de crecer a lo largo de los años porque la sensibilidad de los métodos de detección ha mejorado. Estos métodos siguen siendo menos sensibles que la nariz humana y el número de volátiles de trufa es probable que aumente aún más en el futuro. Para volátiles de trufa blanca, véase Pennazza et al. (2013) y Vita et al. (2015); para otras especies, véase Splivallo et al. (2011). Hay multitud de razones por las que es arriesgado colocar toda la seducción de las trufas en un solo complejo. En un estudio de Talou et al. (1990), se utilizaron solo algunos animales y únicamente se probó una sola especie de trufa, a una sola profundidad superficial, en un único lugar. Diferentes subconjuntos del perfil de complejos volátiles podrían ser más notorios a diferentes profundidades o en diferentes lugares. Además, en el medio natural, hay una amalgama de animales que se sienten atraídos por las trufas, desde jabalíes a campañoles e insectos. Podría ser que esos elementos diferentes del cóctel de compuestos volátiles que producen las trufas sean los que atraen a animales diferentes. Puede ser que el androstenol actúe de forma más sutil en los animales. Podría no ser efectivo por sí solo, como se demostró en el estudio, y sí serlo en combinación con otros compuestos. O si no, puede ser menos importante que encuentren las trufas, y más importante que los animales se las coman. Para más información sobre trufas venenosas, véase Hall et al. (2007). Aparte de *Gautieria*, la especie de trufas *Choiromyces meandriformis* tiene fama de oler «de forma muy penetrante y nauseabunda» y en Italia se la considera tóxica (aunque es popular en el norte de Europa). *Balsamia vulgaris* es otra especie considerada ligeramente tóxica, aunque los perros parece que disfrutan con su aroma a «grasa rancia».

14. Para exportación y empaquetado de trufa, véase Hall et al. (2007), pp. 219, 227.

15. En zonas de exploración de micelio, las hifas suelen apartarse de otras hifas sin ni siquiera tocarse. En partes más maduras del micelio, las hifas tienden a rondar entre sí. En su lugar, los ápices en crecimiento empiezan a atraerse entre sí y a 'autoperseguirse' (Hickey et al., 2002). Cómo las hifas se atraen y se repelen se entiende más bien poco. El trabajo sobre el organismo modelo, el moho del pan *Neurospora crassa*, empieza a aportar algunas pistas. Cada ápice hifal se turna para liberar una feromona que atrae y 'excita' al otro. Mediante este vaivén –«como si se lanzara una pelota», escriben los autores de un estudio– las hifas son capaces de embarcarse y autoperseguirse unas a otras siguiendo este ritmo. Es esta oscilación –una carrera química– la que les permite atraer a las otras sin autoestimularse. Cuando están dando, no pueden detectar la feromona. Cuando la otra es la que da, sí que se estimulan (Read et al., 2009; Goryachev et al., 2012).

16. Para información sobre identidades sexuales del *Schizophyllum commune*, véase McCoy (2016), p. 13; para fusión entre hifas sexualmente incompatibles, véase Saupe (2000), y Moore et al. (2011), cap. 7.5. La aptitud de las hifas para fusionarse entre sí viene determinada por su «compatibilidad vegetativa». Cuando la fusión hifal se ha llevado a cabo, un sistema independiente de identidades sexuales determina qué núcleos pueden someterse a la recombinación sexual. Estos dos sistemas está regulados de forma diferente, aunque la recombinación sexual no puede ocurrir a menos que las hifas se hayan fusionado entre sí y hayan compartido material genético. El resultado de fusiones vegetativas entre diferentes redes de micelios puede ser complejo e impredecibles (Rayner et al., 1995, Roper et al., 2013).

17. Para más información sobre sexo de las trufas, véase Selosse et al. (2017), Rubini et al. (2007), y Taschen et al. (2016); para ejemplos de intersexualidad en el mundo animal, véase Roughgarden (2013). Si los truficultores desean de verdad entender de qué manera cultivar trufa, antes deben comprender el sexo de la trufa. El problema es que no quieren entenderlo. Los hongos de la trufa nunca han sido sorprendidos en el acto de la fertilización. Quizá tampoco sorprenda tanto dados sus inaccesibles estilos de vida. Más peculiar es que nadie haya encontrado jamás una hifa paternal; a pesar de buscarla, los investigadores solo han encontrado hifas maternales que crecían de raíces de árboles y en el suelo, ya sea «+» o «–». Las trufas paternales parecen vivir menos y desaparecen tras la fecundación: «Nacen, practican un poco de sexo y después nada» (Dance, 2018).

18. Las hifas de algunos tipos de hongos micorrícicos pueden replegarse a sus esporas y rebrotar en un futuro (Wipf et al., 2019).

19. Para influencia fúngica en las raíces de las plantas, véase Ditengou et al. (2015), Li et al. (2016), Splivallo et al. (2009), Schenkel et al. (2018) y Moisan et al. (2019).

20. Para información sobre la evolución de comunicación en simbiosis micorrícicas, incluida la supresión de respuesta inmunológica, véase Martin et al. (2017); para exposición del sistema de señales entre planta y hongo y su base genética, véase Bonfante (2018); para comunicación entre planta y hongo en otros tipos de asociación micorrícica, véase Lanfranco et al. (2018). Las proposiciones químicas que liberan los hongos están matizadas y tienen un amplio margen dinámico. Los volátiles que utilizan para comunicarse con una planta también podrían usarlos para comunicarse con las poblaciones bacterianas circundantes (Li et al., 2016, Deveau et al., 2018). Los hongos utilizan compuestos volátiles para desalentar a hongos rivales; las plantas usan complejos volátiles para disuadir a hongos no deseados (Li et al., 2016, Quintana-Rodriguez et al., 2018). Los mismos volátiles pueden tener efectos diferentes en plantas en función de su concentración. Las hormonas de la planta producidas por algunas trufas para manipular la fisiología de sus huéspedes pueden matar plantas en concentraciones más altas y pueden servir como armas competitivas para disuadir a plantas que podrían competir con sus propias plantas asociadas (Splivallo et al., 2007, 2011). Algunas especies de trufas están parasitadas por otros hongos, probablemente atraídas por sus invitaciones químicas. El parásito de la trufa, *Tolypocladium capitata*, es primo hermano de los hongos *Ophiocordyceps*, que parasita insectos y tiene fama de parasitar ciertas especies de trufa como la criadilla de ciervo, *Elaphomyces* (Rayner et al., 1995, para fotos. véase mushroaming.com/cordyceps-blog [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]).

21. Para el primer informe sobre la fructificación de la *Tuber melanosporum* en las islas Británicas –presumiblemente debido al cambio climático–, véase Thomas & Büntgen (2017). El método 'moderno' utilizado para cultivar *Tuber melanosporum* no se desarrolló hasta 1969, y creó la primera remesa de trufas inoculadas artificialmente en 1974. Las raíces en semilleros están incubadas con el micelio de *Tuber melanosporum* y se trasplantan cuando las raíces están completamente colonizadas por el hongo. Después de varios años, si las condiciones son las correctas, el hongo empezará a producir trufa. Cada vez hay más superficie de tierra para el cultivo de trufas (más de 40 000 ha en todo el mundo), y los huertos de trufa blanca de Périgord fructifican con éxito en países que van de Estados Unidos a Nueva Zelanda (Büntgen et al., 2015). Charles Lefevre explicó que, aunque él escribiera su método paso a paso, difícilmente otra persona conseguiría lo mismo, pues hay un gran número de conocimientos que funcionan por intuición difíciles de comunicar y controlar. Los detalles más insignificantes –desde los caprichos de la temporada a las condiciones en vivero– marcan una enorme diferencia. El secretismo es parte del problema. Los agricultores de trufas pasan buena parte de su tiempo en una nube de incertidumbre, dando palos de ciego porque todo el mundo guarda celosamente sus «conocimientos privados». «Es una tradición que se remonta a la recogida de setas», me explicó Ulf Büntgen. «Mucha gente sale a buscar setas por el bosque pero ellos nunca te cuentan nada. Si les preguntas cómo ha ido el día, dicen "¡Oh, llené la cesta hasta arriba!", y probablemente no encontraron nada. Es una actitud que se repite generación tras generación y la investigación no avanza.» Sin perder la fe, Lefevre sigue cultivando algunos árboles cada año con el micelio del esquivo *Tuber magnatum* con la esperanza de que algo, de alguna manera, podría empujarlos a dar fruto. Provisto del mismo optimismo, sigue experimentando y apareando especies de trufas europeas con árboles americanos (resulta que el *Tuber magnatum* establece una asociación saludable –aunque infructuosa– con el álamo temblón). Otros agricultores aíslan las bacterias de las trufas con la esperanza de que animarán el crecimiento del micelio *Tuber* (algunos grupos de bacterias sí parece que sean útiles). Le pregunté a Lefevre: «¿Hubo mucha gente que comprara sus árboles con *Tuber magnatum* para sus huertos de trufas?» «No mucha –contestó–, pero vendemos los árboles con el espíritu que, si nadie lo intenta, nadie lo conseguirá.»

22. Para información sobre espionaje químico, véase Hsueh et al. (2013).

23. Nordbring-Hertz (2004); Nordbring-Hertz et al. (2011).

24. Nordbring-Hertz (2004).

25. Hoy, el campo de la biología más exacerbado por los debates sobre antropomorfismo es el estudio de las plantas y de las maneras como sienten y responden a su entorno. En el 2007, 36 importantes botánicos firmaron una carta que rechazaba el emergente campo de la «neurobiología de las plantas» (Alpi et al., 2007). Aquellos que postularon el término argumentaron que las plantas tienen un sistema de señales eléctricas y químicas equivalente a las que se encuentran en seres humanos y otros animales. Los 36 autores de la carta esgrimieron que estas eran «analogías superficiales y extrapolaciones cuestionables». Le siguió un debate acalorado (Trewavas, 2007). Desde una perspectiva antropológica, estas controversias resultan fascinantes. Natasha Myers, una antropóloga de la York University de Canadá, entrevistó a un grupo de botánicos sobre cómo entendían que se comportaban las plantas (Myers, 2014). Ella describe la política problemática del antropomorfismo, y las formas diferentes con las que los investigadores lidian con el problema.

26. Kimmerer (2013), cap. *Learning the Grammar of Animacy*.

27. «Su relación con sus árboles huésped se entiende muy poco», explicó Charles Lefevre; «incluso en lugares donde la productividad de trufas es alta, la proporción de raíces de árboles colonizadas por el hongo, a menudo, es extremadamente baja. Esto significa que la productividad no puede ser explicada en términos de la cantidad de energía que el hongo recibe del árbol huésped».

28. Para olores y sus analogías, véase Burr (2012), cap. 2. La antropóloga Anna Tsing escribe que en el período Edo en Japón (1603-1868) el olor de setas *matsutake* era un tema popular en poesía. Las salidas para buscar *matsutake* aumentaron hasta convertirse en el equivalente de otoño a las fiestas de la floración de los cerezos de primavera, y las referencias al «aroma de otoño» o al «aroma de las setas» se convirtieron en estados de ánimo que resultaban familiares en la poesía.

1. Para la orientación de los hongos en laberintos, véase Hanson et al. (2006), Held et al. (2009, 2010, 2011, 2019). Para vídeos excelentes, véase información complementaria de Held et al. (2011); www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878614611000249 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020] y Held et al. (2019); www.pnas.org/content/116/27/13543/tab-figures-data [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

2. Para hongos marinos, véase Hyde et al. (1998), Sergeeva y Kopytina (2014) y Peay (2016); para hongos en el polvo, véase Tanney et al. (2017); para estimación de la longitud de las hifas de los hongos en suelos, véase Ritz y Young (2004).

3. Se habla habitualmente de este fenómeno. Véase Boddy et al. (2009) y Fukusawa et al. (2019).

4. Fukusawa et al. (2019). ¿Provocó el trozo de madera cambios en concentraciones químicas o expresiones génicas en toda la red? ¿O el micelio se redistribuyó rápidamente a sí mismo por dentro del primer trozo de madera para volver a crecer en una dirección? Lynne Boddy y sus colegas no están seguros. Los investigadores que retan a los hongos con laberintos microscópicos han observado que las estructuras del interior de los ápices en crecimiento se comportan como giroscopios internos, y dotan de una memoria direccional a las hifas que les permite recuperar la primera dirección de crecimiento después de haber sido desviadas por un obstáculo (Held et al., 2019). Sin embargo, es poco probable que este mecanismo sea el responsable del efecto que Boddy y sus colegas observaron porque se retiraron todas las hifas –incluidos sus ápicesdel primer trozo de madera antes de que se colocara en la placa nueva.

5. Las hifas de los hongos son células improbables en cuerpos animales o vegetales, que (normalmente) tienen límites claros. De hecho, siendo rigurosos, no se deberían describir las hifas como células. Muchos hongos tienen hifas con divisiones a lo largo de su longitud, conocidas como «septo», pero se pueden abrir o cerrar. Cuando están abiertos, los contenidos hifales pueden fluir entre las 'células', y las redes de micelio es como si estuvieran en un estado 'supracelular' (Read, 2018). Una red de micelio puede fundirse con muchas otras para hacer extensos 'gremios', en los que una red puede compartir su contenido con otras. ¿Dónde empieza y termina una célula? ¿Dónde empieza y termina una red? A menudo estas preguntas no tienen respuesta. Para un estudio reciente sobre enjambres, véase Bain y Bartolo (2019), y comentarios de Ouellette (2019). Este estudio trata los enjambres como entidades *per se*, en lugar de tratarlos como un conjunto de agentes individuales que se comportan según unas reglas comunitarias. Al tratar el enjambre como un patrón de flujo fluido, su comportamiento se puede modelar de forma más efectiva. Es posible que estos modelos verticales 'hidrodinámicos' puedan ser utilizados para modelar el crecimiento de los ápices hifales de forma más efectiva que los modelos de enjambres basados en normas de interacción comunitaria.

6. Para hongos mucilaginosos, véase Tero et al. (2010), Watanabe et al. (2011) y Adamatzky (2016); para hongos, véase Asenova et al. (2016) y Held et al. (2019).

7. Para información sobre intercambios de micelio, véase Bebber et al. (2007).

8. Para información sobre selección natural de vínculos en redes de micelio, véase Bebber et al. (2007).

9. Para información sobre el papel de la biolumniscencia de los hongos y la dispersión de esporas por insectos, véase Oliveira et al. (2015); para «fuegos fatuos» y el *Turtle, véase* www.cia.gov/library/publications/intelligence-history/intelligence/intelltech.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020], y Diamant (2004), p. 27. En una guía de hongos publicada en 1875, Mordecai Cooke escribió que los hongos bioluminiscentes solían estar en los puntales de madera empleados en las minas de carbón. Los mineros «están familiarizados con los hongos fosforescentes, y los hombres afirman que dan luz suficiente 'para verse las manos'. Los especímenes de *Polyporus*eran tan luminosos que se podían ver en la oscuridad a una distancia de 20 yardas».

10. Los vídeos de Stefan Olsson se pueden ver en línea en doi.org/10.6084/m9.gshare.c.4560923.v1 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

11. Un estudio publicado por Oliveira et al. (2015) desveló que el micelio bioluminiscente del *Neonothopanus gardneri* estaba regulado por un ritmo circadiano regulador de temperatura. Los autores plantean la hipótesis de que al aumentar la bioluminiscencia de noche, los hongos están mejor capacitados para atraer a los insectos que dispersan sus esporas. El fenómeno que Stefan Olsson observó no se puede explicar según el ritmo circadiano porque se realizó solo una vez en varias semanas.

12. Para el diámetro de las hifas, véase Fricker et al. (2017). El ecólogo R. H. Whittaker observó que la evolución animal es una historia de «cambio y extinción», mientras que la evolución de los hongos es una de «conservadurismo y continuidad». La gran variedad de planes corporales animales en el registro de fósiles ilustra las muchas formas que han descubierto los animales para ingerir elementos de sus mundos. No puede decirse lo mismo de los hongos. Los hongos miceliares han tenido mucho más tiempo para evolucionar que muchos organismos, pero los ancestrales hongos fosilizados son extraordinariamente parecidos a los que viven hoy en día. Parece que no hay tantas maneras de crear vida a través de una red. Véase Whittaker (1969).

13. Para redes de micelio que atrapan hojas caídas, véase Hedger (1990).

14. Para medición de la presión ejercida por el patógeno de la explosión de arroz, véase Howard et al. (1991); para el cálculo del autobús escolar de ocho toneladas y para información general del crecimiento fúngico invasivo, véase Money (2004a). Para ejercer semejantes altas presiones, las hifas penetradoras deben adherirse a la planta para impedir que sean rechazadas de la superficie. Y esto lo hacen produciendo un adhesivo que puede resistir presiones de más de 10 megapascales (MPa) –el *superglue* puede resistir presiones de 15-25 MPa, aunque probablemente no en la superficie cerosa de una hoja de una planta (Roper y Seminara, 2017).

15. Las ‘cámaras’ celulares se conocen como «vesículas». El crecimiento del ápice fúngico está gestionado por una estructura celular u ‘orgánulo’ llamado *Spitzenkörper*, o cuerpo apuntado. A diferencia de la mayoría de orgánulos, el *Spitzenkörper* no tiene un límite claramente definido. No es una estructura singular como un núcleo, aunque parece que se mueve como tal. Se cree que el *Spitzenkörper*es como un «centro de abastecimiento de vesículas», que recibe y clasifica vesículas desde el interior de las hifas y las distribuye hasta los ápices hifales. El *Spitzenkörper* se pilota a sí mismo y a sus hifas. La ramificación de hifas se desencadena cuando el *Spitzenkörper*se divide. Cuando el crecimiento cesa, el *Spitzenkörper* desaparece. Si uno cambia la posición del *Spitzenkörper*dentro del ápice que crece, puede conducir la hifa en otra dirección. Lo que hace el *Spitzenkörper* también lo puede deshacer, disolviendo paredes hifales que permiten la fusión entre diferentes partes de una red de micelio. Para una introducción al *Spitzenkörper* y a las «600 vesículas por segundo», véase Moore (2013a), cap. 2; para más información sobre el *Spitzenkörper*, véase Steinberg (2007); para una anotación sobre las hifas de algunas especies que se las puede ver extendiéndose a tiempo real, véase Roper y Seminara (2017).

16. El filósofo francés Henri Bergson describió el paso del tiempo en términos que recuerdan a una hifa fúngica: «Duración es el desarrollo ininterrumpido del pasado que mordisquea hasta convertirse en futuro y que crece a medida que avanza» (Bergson 1911, p. 7). Para el biólogo J. B. S. Haldane, la vida no estaba poblada de cosas sino de procesos estabilizados. Haldane incluso llegó a considerar «el concepto de ‘cosa’, o unidad material», que era «inútil» en el pensamiento biológico (Dupré y Nicholson 2018). Para una presentación general a la biología procesal, véase Dupré y Nicholson (2018); para una cita de William Bateson, véase Bateson (1928), p. 209.

17. Para las setas denominadas falos hediondos que atraviesan el asfalto, véase Niksic et al. (2004); para Mordecai Cooke, véase Moore (2013b), cap. 3. El crecimiento de ápices se da en otros organismos, aparte de los hongos, pero es una excepción, no una regla. Las neuronas animales crecen al alargarse por la punta, igual que algunas células vegetales, como los tubos polínicos, pero ninguna puede alargarse indefinidamente como hacen las hifas de los hongos en condiciones adecuadas (Riquelme 2012).

18. Frank Dugan describe a las «esposas de las hierbas» o «mujeres sabias» de la Europa de la Reforma como «parteras» para el campo de la micología moderna (Dugan, 2011). Muchas líneas de razonamiento sugieren que las mujeres eran las principales poseedoras de la sabiduría tradicional de los hongos. Dichas mujeres fueron la fuente de casi toda la información sobre setas que describieron formalmente los hombres eruditos de la época, como Carolus Clusius (1526-1609) y Francis van Sterbeeck (1630-1693). Un buen número de cuadros, desde *The Mushroom Seller* (Felice Boselli, 1650-1732), a *Mujeres recogiendo setas* (Camille Pissarro, 1830-1903) o *The Mushroom Gatherers* (Felix Schlesinger, 1833-1910), retratan a mujeres trabajando con setas. Muchos relatos de viajeros europeos de los siglos XIX y XX describen a mujeres vendiendo o recogiendo setas.

19. Para información y una definición amplia de polifonía, véase Bringhurst (2009), cap. 2: «Cantar con las ranas: la teoría y práctica de la polifonía literaria».

20. Para estimación del ritmo de flujo a través de los cordones y rizomorfos, véase Fricker et al. (2017). En general, se cree que los hongos utilizan sustancias químicas para regular su crecimiento, pero poco se sabe de estas sustancias (Moore et al., 2011, cap. 12.5, Moore, 2005). ¿Cómo pueden semejantes formas tan bien definidas surgir de una masa uniforme de hebras de hifas? El dedo de un animal es una forma elaborada. Pero está formada por una combinación elaborada de diferentes tipos de célula, con sus glóbulos blancos y rojos, sus osteocitos, sus células nerviosas y todo el resto. Las setas también son formas elaboradas, pero son los copetes esculpidos de un tipo de célula: las hifas. Sigue siendo un misterio cómolos hongos crean las setas. En 1921, el biólogo ruso del desarrollo Alexander Gurwitsch estudió el desarrollo de las setas. El tallo de una seta, el anillo que rodea dicho tallo y su sombrero están hechos de hifas, enmarañados como «un pelo descuidado y sin peinar». Esto es lo que le desconcertó. Construir una seta desde la nada solo con hifas es como intentar construir una cara desde la nada solo con células musculares. Para Gurwitsch, la forma en la que las hifas crecen juntas para crear formas complejas fue uno de los acertijos centrales en toda la biología del desarrollo. La organización de un animal queda especificada en la fase más temprana de su desarrollo. La forma animal surge a partir de partes altamente organizadas; la regularidad produce más regularidad. Pero la forma de las setas surge a partir de partes menos organizadas. Una forma regular surge a partir de un material irregular (Von Bertalanffy, 1933, pp. 112-117). Inspirado en parte por el crecimiento de las setas, Gurwitsch teorizó que el desarrollo de organismos estaba guiado por campos. Las virutas de hierro se pueden reorganizar utilizando un campo magnético. De una manera análoga, Gurwitsch dio un paso más: la organización de células y tejidos del interior de un organismo se podría formar por campos biológicos que dan forma. La teoría de los campos del desarrollo de Gurwitsch ha sido escogida por bastantes biólogos contemporáneos. Michael Levin, un investigador de la Tufts University de Boston, describe cómo las células están bañadas en un «rico campo de información», independientemente de si están constituidas por indicios físicos, químicos o eléctricos. Estos campos de información ayudan a explicar cómo pueden surgir formas complejas (Levin, 2011 y 2012). Un estudio publicado en el 2004 construyó un modelo matemático que simulaba el crecimiento del micelio fúngico –un 'cíberhongo' (Meskkauskas et al., 2004, Money, 2004b, Moore, 2005)–. En el modelo, cada ápice hifal puede influir en el comportamiento de otros ápices hifales. El estudio revela que formas tipo setas pueden surgir cuando todos los ápices hifales siguen exactamente las mismas normas de crecimiento. Estos descubrimientos insinúan que las formas de las setas pueden responder al «comportamiento colectivo» de las hifas sin la necesidad del tipo de coordinación de desarrollo jerarquizada que hay en animales y plantas. Pero para que esto funcione, decenas de miles de ápices hifales deben obedecer el mismo grupo de normas a la vez, y cambiar a otro grupo diferente de normas al mismo tiempo –un enmarcado moderno del enigma de Gurwitsch–. Los investigadores que crearon el cíberhongo tienen la hipótesis que un 'reloj' celular podría coordinar los cambios de desarrollo, pero aún no se ha identificado dicho mecanismo, y los medios con los que los hongos vivos coordinan su desarrollo siguen siendo un misterio.

21. Para microtúbulos motores, véase Fricker et al. (2017); para *Serpula* en Haddon Hall, véase Moore (2013b), cap. 3; para información del papel del flujo en el desarrollo de los hongos, véase Alberti (2015) y Fricker et al. (2017). El índice de flujo en las hifas de los hongos va de 3 a 70 micrómetros por segundo, a veces más de 100 veces más rápido que la difusión pasiva sin más (Abadeh y Lew, 2013). A Alan Rayner le gusta establecer una analogía con los ríos porque estos son «sistemas que forman paisaje y son formados por él». Un río fluye entre sus orillas. En el proceso, forma las orillas por las que fluye. Rayner entiende las hifas como ríos romos que fluyen entre orillas que construyen para sí mismas. Como en cualquier sistema de flujos, la presión lo es todo. Las hifas absorben el agua de sus entornos. El flujo interior de agua aumenta la presión en la red. Pero la presión por sí misma no la manda fluir. Para que el material fluya por el micelio, las hifas tienen que hacer espacio para que fluya por dentro. Esto es el crecimiento de las hifas. El contenido de las hifas fluye hacia los ápices hifales en crecimiento. El agua fluye por la red miceliar hacia una seta que se hincha rápidamente. Si una invierte los gradientes de presión, esa una invierte el flujo (Roper et al., 2013). No obstante, las hifas, al parecer, son capaces de regular el flujo en formas más precisas. Un estudio publicado en el 2019 trazó el movimiento de los nutrientes y complejos señalizadores por las hifas a tiempo real. En algunas hifas grandes, el flujo de fluido celular cambiaba de dirección cada pocas horas, permitiendo a los complejos señalizadores y a los nutrientes fluir por la red en ambas direcciones. Durante unas tres horas, el flujo discurría en una dirección. Y durante las tres horas siguientes, el flujo iba en la otra dirección. De qué manera las hifas son capaces de controlar el flujo de material por su interior se desconoce, pero con el cambio rítmico de dirección del flujo celular, las sustancias se distribuyen con mejor eficacia por la red. Los autores suponen que la apertura y cierre coordinado de los poros hifales son un «factor importante» en la coordinación del flujo bidireccional por las hifas transportadoras (Schmieder et al., 2019; véase también los comentarios de Roper y Dressaire, 2019). Las «vacuolas contráctiles» son otra forma con la que los hongos podrían dirigir su flujo interno. Estas son conductos internos de las hifas que con ondas de contracción son capaces de abrirse paso, y de las que se ha revelado que desempeñan un importante papel transportador por el interior de las redes de micelio (Shepherd et al., 1993, Rees et al., 1994, Allaway y Ashford, 2001, Ashford y Allaway, 2002).

22. Roper et al. (2013); Hickey et al. (2016); Roper y Dressaire (2019). Vídeos disponibles en YouTube: *Nuclear dynamics in a fungal chimera*, www.youtube.com/watch?v=_FSuUQP_BBc [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; *Nuclear traffic in a lamentousfungus*, www.youtube.com/watch?v=AtXKcro5o30 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

23. Cerdá-Olmeda (2001); Ensminger (2001), cap. 9.

24. Para «el más inteligente...», véase Cerdá-Olmeda (2001); para la respuesta de la evasión, véase Johnson y Gamow (1971) y Cohen et al. (1975).

25. La luz influye en muchos aspectos de la vida del micelio, desde el desarrollo de setas a la construcción de relaciones con otros organismos –el temido hongo de explosión de arroz solo infecta a su planta huésped por la noche (Deng et al., 2015)–. Para fotosensibilidad en hongos, véase Purschwitz et al. (2006), Rodríguez-Romero et al. (2010), Corrochano y Galland (2016); para sensibilidad a la topografía de las superficies, véase Hoch et al. (1987) y Brand y Gow (2009); para sensibilidad a la gravedad, véase Moore (1996), Moore et al. (1996), Kern (1999), Bahn et al. (2007) y Galland (2014).

26. Darwin y Darwin (1880), p. 573. Para argumentos a favor de «raíz-cerebro», véase Trewavas (2016) y Calvo Garzón y Keijzer (2011); para argumentos en contra de las analogías con el cerebro, véase Taiz et al. (2019); para la introducción al debate sobre la «inteligencia de las plantas», véase Pollan (2013).

27. Para comportamiento de los ápices hifales, véase Held et al. (2019).

28. Para anillos de hadas, véase Gregory (1982).

29. Algunos investigadores han informado de repentinas contracciones de las hifas, o sacudidas, que podrían ser utilizadas para transmitir información. Pero no son lo bastante regulares para que sirvan como base para estudiar el momento a momento. Véase McKerracher y Heath (1986 a y b), Jackson y Heath (1992), Reynaga-Peña y Bartnicki-García (2005). Hay quien propone que la información puede ser transmitida por redes de micelio cambiando los patrones de flujo dentro de la red, en algunos casos cambiando la dirección del flujo en oscilaciones rítmicas (Schmieder et al., 2019, Roper y Dressaire, 2019). Esta es una prometedora línea de investigación, y puede ser útil para pensar en las redes de micelio como una especie de «computadora líquida», de la que se han construido muchas versiones, empleadas en sistemas que van desde aviones de combate a sistemas de control de reactores nucleares (Adamatzky, 2019). Sin embargo, los cambios en el flujo miceliar siguen siendo demasiado lentos para explicar muchos fenómenos. Los pulsos regulares de actividad metabólica que pasan por las redes de micelio son una forma plausible para que las redes de micelio coordinen su comportamiento, pero también son demasiado lentos para explicar muchos fenómenos (Tlalka et al., 2003, 2007, Fricker et al., 2007a y b, Fricker et al., 2008). El organismo simbólico de red viva es el resolutivo moho mucilaginoso. Sin ser hongos, estos mohos han desarrollado maneras para coordinar sus cuerpos expansivos y metamorfos, y proporcionan un modelo útil para pensar sobre los desafíos y oportunidades a las que se enfrentan los hongos de micelio. Crecen más rápidamente que el micelio fúngico, lo que los hace más fáciles de estudiar. Los mohos mucilaginosos comunican entre diferentes partes de sí mismos utilizando pulsos rítmicos que se propagan por las ramas de sus redes en ondas de contracción. Las ramas que han encontrado alimento producen una molécula de señal que aumenta la fuerza de la contracción. Las contracciones más fuertes provocan un mayor volumen de contenido celular que fluye por esa rama de la red. Cuando se da una contracción, pasa más material por una ruta corta que una larga. Cuanto más material circula por una ruta, más se fortalece. Es un bucle de retroalimentación que permite al organismo redirigirse por rutas ‘exitosas’ en detrimento de las ‘menos exitosas’. Los pulsos de las diferentes partes de su red se combinan, se modifican y se refuerzan entre sí. De esta manera, los mohos mucilaginosos pueden integrar información desde varias ramas y solucionan complejos problemas de orientación sin necesitar de un lugar especial para hacerlo (Zhu et al., 2013, Alim et al., 2017, Alim, 2018).

30. Un investigador observó a mediados de la década de 1980 que «la electrobiología fúngica es lo más lejos que se puede estar de la corriente principal actual de la investigación biológica» (Harold et al. 1985). Sin embargo, desde entonces se ha descubierto que los hongos reaccionan a la estimulación eléctrica de maneras potencialmente sorprendentes. Someter el micelio a descargas eléctricas puede estimular considerablemente la producción de setas (Takaki et al., 2014). Los cultivos de la muy apreciada seta *matsutake* –una especie micorrícica que se ha resistido hasta la fecha al cultivo– se pueden haber prácticamente duplicado al dar una descarga eléctrica de 50 kilovoltios al terreno próximo a sus árboles asociados. Los investigadores dirigieron el estudio teniendo en cuenta la información facilitada por unos recolectores de *matsutake* quienes les dijeron que se podían encontrar muchísimas setas en el lugar donde previamente había impactado un rayo (Islam y Ohga, 2012). Para potenciales de acción, véase Brunet y Arendt (2015); para los primeros informes de potenciales de acción en hongos, véase Slayman et al. (1976); para información general electrofisiología de los hongos, véase Gow y Morris (2009); para «bacterias cable», véase Pfeffer et al. (2012); para ondas de actividad similares a los potenciales de acción en colonias bacterianas, véase Prindle et al. (2015), Liu et al. (2017), Martínez-Corral et al. (2019) y sumario en Popkin (2017).

31. Olsson midió la velocidad del viaje calculando el espacio entre la estimulación y midiendo una respuesta. Por consiguiente, la velocidad estimada incluía el tiempo que se toma el hongo para sentir el estímulo, para que el estímulo viaje del punto A al punto B, y para que la respuesta quede registrada por los microelectrodos. La velocidad real del viaje del impulso, por tanto, podía ser considerablemente más rápida que esta estimación. El índice más rápido del grueso del flujo medido hasta la fecha en el micelio fúngico era de unos 180 mm por hora (Whiteside et al., 2019). Los impulsos tipo potenciales de acción que Stefan Olsson midió viajaron a 1800 mm por hora.

32. Olson y Hansson (1985), Olsson (2009). Para el registro de Olsson del cambio en el índice de disparo tipo potencial de acción, véase doi.org/10.6084/m9.gshare.c.4560923.v1 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

33. En un artículo titulado «El cerebro: un concepto en cambio constante», Oné Pagán (2019) señala que no hay una definición de cerebro generalmente aceptada. Argumenta que tiene mucho más sentido definir los cerebros en términos de qué pueden *hacer*, en lugar de basarse en detalles específicos de su anatomía. Para regulación de poros en redes de hongos, véase Jedd y Pieuchot (2012) y Lai et al. (2012).

34. Adamatzky (2018 a y b).

35. Para ejemplos de computación en red, véase van Delft et al. (2018) y Adamatzky (2016).

36. Adamatzky (2018 a y b).

37. Como ya indico en «Micología radical», Andrew Adamatzky forma parte de una colaboración interdisciplinaria llamada Fungal Architectures (FUNGAR), que espera incorporar circuitos de computación fúngica a estructuras arquitectónicas.

38. Pregunté a Olsson por qué nadie había continuado con sus estudios desde la década de 1990. «Cuando presentaba el trabajo en convenciones la gente se mostraba muy, pero que muy interesada» me dijo Olsson, «pero pensaban que era raro». Todos los investigadores a los que pregunté por su estudio están fascinados y quieren saber más. Desde entonces su estudio ha sido mencionado muchas veces. Pero él no pudo conseguir financiación para seguir estudiando la materia. Se consideró como demasiado probable que no llegara a nada; «demasiado arriesgado», en jerga técnica.

39. Para «mito arcaico», véase Pollan (2013); para ancestrales procesos celulares que subyacen bajo el comportamiento cerebral, véase Manicka y Levin (2019). La «hipótesis del movimiento» plantea que los cerebros se desarrollaron como una causa y consecuencia de la necesidad de los animales de cambiar de sitio. Los organismos que no cambian de sitio no se enfrentan al mismo tipo de desafíos y han desarrollado diferentes tipos de redes para lidiar con los problemas a los que se enfrentan (Solé et al., 2019).

40. Darwin (1871), citado en Trewavas (2014), cap. 2. Para «cognición mínima», véase Calvo Garzón y Keijzer (2011); para «cognición biológicamente corpórea», véase Keijzer (2017); para cognición vegetal, véase Trewavas (2016); para cognición ‘basal’ y grados de cognición, véase Manicka y Levin (2019); para información sobre inteligencia bacteriana, véase Westerhoff et al. (2014); para información sobre diferentes tipos de ‘cerebro’, véase Solé et al. (2019).

41. Para «neurociencia de redes», véase Bassett y Sporns (2017) y Barbey (2018). Los avances científicos que hacen posible producir cultivos de tejido cerebral humano en una placa –conocidos como «organoides» de cerebro– complican aún más, si cabe, nuestra comprensión de la inteligencia. Las cuestiones filosóficas y éticas surgidas por estas técnicas –y la ausencia de respuestas claras– son un recordatorio de cómo los límites de nuestros propios seres biológicos no son nada claros. En el 2018, varios neurocientíficos y bioéticos destacados publicaron un artículo en *Nature* en el que planteaban algunas de estas cuestiones (Farahany et al., 2018). En las próximas décadas, los avances en el cultivo de tejido cerebral posibilitarán la producción de ‘mini cerebros’ artificiales que imitarán de forma más precisa el funcionamiento del cerebro humano. Los autores escriben que:

> Cuando los sustitutos del cerebro se hagan más grandes y más sofisticados, las posibilidades de que tengan aptitudes parecidas a la conciencia humana podrían ser menos lejanas. Dichas aptitudes podrían incluir la capacidad de sentir (en cierta medida) placer, dolor o angustia; la capacidad para almacenar y rescatar recuerdos; o quizá incluso tener alguna percepción de identidad o conocimiento de uno mismo.

Hay quienes les preocupa que los organoides de cerebro puedan algún día aventajarnos (Thierry 2019).

42. Para experimentos con platelmintos, véase Shomrat y Levin (2013); para sistemas nerviosos de los pulpos, véase Hague et al. (2013) y Godfrey-Smith (2017), cap. 3.

43. Bengtson et al. (2017), Donoghue y Antcliffe (2010). Con suma cautela, Bengtson y demás colegas señalan que sus especímenes podrían no ser hongos de verdad pero podrían pertenecer a un linaje distinto de organismos que, por lo que se ve, se parecen a los hongos actuales. Uno puede entender sus dudas. Los autores señalan que si estos fósiles de micelio fueran hongos de verdad, ‘anularían’ nuestro actual entendimiento de dónde y cómo se desarrollaron los primeros hongos. Los hongos no se fosilizan bien y no se sabe con exactitud cuándo se ramificó el primer hongo del árbol de la vida. Métodos basados en ADN –utilizando el llamado «reloj molecular»– sugieren que los primeros hongos se bifurcaron hace unos 1000 millones de años–. En el 2019, los investigadores informaron del micelio fosilizado descubierto en el Ártico que data de 1000 millones de años aprox. (Loron et al., 2019, Ledford, 2019). Antes de este descubrimiento, no había duda de que los fósiles fúngicos más antiguos datan de 450 millones de años aprox. (Taylor et al., 2007). La seta del orden Agaricales más antigua descubierta data de hace 120 millones de años aprox. (Heads et al., 2017).

44. Para Barbara McClintock, véase Keller (1984).

45. *Ibid*.

46. Von Humboldt (1849), vol. 1, p. 20.

1. BIOMEX es uno de varios proyectos astrobiológicos. Para BIOMEX, véase De Vera et al. (2019); para instalación de EXPOSE, véase Rabbow et al. (2009).

2. Para la cita de «límites y limitaciones», véase Sancho et al. (2008); para una reseña de organismos enviados al espacio, también líquenes, véase Cottin et al. (2017); para líquenes como modelos para la investigación astrobiológica, véase Meeßen et al. (2017) y de la Torre Noetzel et al. (2018).

3. Wulf (2015), cap. 22.

4. Para información sobre Schwendener y la «hipótesis de la naturaleza dual», véase Sapp (1994), cap. 1.

5. Sapp (1994), cap. 1; para «romance espectacular», véase Ainsworth (1976), cap. 4. Algunos biógrafos de Beatrix Potter sugieren que ella defendía la hipótesis dual de Schwendener pero quizá cambiara de opinión a lo largo de su vida. Sin embargo, en 1897, en una carta a Charles MacIntosh, un cartero rural y naturalista *amateur*, parecía que había adoptado una posición clara al respecto:

> Lo ve, no creemos en la teoría de Schwendener, y los libros más antiguos dicen que los líquenes se convierten gradualmente en hepáticas, a través de especies foliáceas. Me gustaría mucho cultivar la espora de uno de esos grandes líquenes planos, y también la espora de una hepática real para comparar las dos formas de brotar. Los nombres no importan mientras pueda secarlas. Si me pudiera dar algunas esporas más de liquen y de hepática cuando cambie el tiempo le estaría muy agradecida. (Kroken 2007)

6. El árbol es una de las imágenes fundacionales de las teorías modernas de la evolución y fue la única ilustración en *El origen de las especies* de Darwin. Pero Darwin no fue el primero en emplear la imagen. Durante siglos, la forma ramificada de los árboles ha proporcionado un marco para el pensamiento humano en campos que van de la teología a las matemáticas. Quizá los que resultan más familiares son los árboles genealógicos, que tienen sus raíces en el Antiguo Testamento («el Árbol de Jedé»).

7. Para un debate sobre la representación de líquenes de Schwendener, véase Sapp (1994), cap. 1, y Honegger (2000); para Albert Frank y «simbiosis», véase Sapp (1994), cap. 1, Honegger (2000) y Sapp (2004). Albert Frank empleó por primera vez la palabra «*symbiotismus*» (cuya traducción literal sería «simbiotismo»).

8. Los predecesores de la *Elysia* verde –*Elysia viridis*– ingerían algas que seguían viviendo dentro de sus tejidos. Las *Elysia* verdes (babosas de mar verdes) obtienen su energía de la luz solar, igual que las plantas. Para nuevos descubrimientos simbióticos, véase Honegger (2000); para «líquenes animales», véase Sapp (1994), cap. 1; para «microlíquenes», véase Sapp (2016).

9. Para la cita de Huxley, véase Sapp (1994), p. 21.

10. Para la estimación del 8%, véase Ahmadjian (1995); para una superficie mayor que la de los bosques tropicales, véase Moore (2013a), cap. 1; para «colgados en *hashtags*», véase Hillman (2018); para la diversidad de hábitats de líquenes, también erráticos y los que se alojan en insectos, véase Seaward (2008); para una entrevista con Kerry Knudsen, véase https://aeon.co/videos/how-lsd-helped-a-scientist-find-beautyin-a-peculiar-and-overlooked-form-of-life [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

11. Para cita de «cada monumento», véase twitter.com/GlamFuzz [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; para monte Rushmore, véase Perrottet (2006); para los moais de la isla de Pascua, véase www.theguardian.com/world/2019/mar/01/easter-island-statues-leprosy [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

12. Para el acercamiento de los líquenes al meteorización, véase Chen et al. (2000), Seaward (2008) y Porada et al. (2014); para líquenes y formación de suelo, véase Burford et al. (2003).

13. Para historia de la panspermia y cuestiones relacionadas, véase Temple (2007) y Steele et al. (2018).

14. Como respuesta a las preocupaciones de Lederberg sobre la infección interplanetaria, la NASA ideó formas para esterilizar naves espaciales antes de despegar de la Tierra pero no acabaron de funcionar: hay muchas bacterias y hongos a bordo de la Estación Espacial Internacional (Novikova et al., 2006). Cuando la misión *Apolo 11* regresó del primer viaje a la Luna en 1969, los astronautas estuvieron aislados tres semanas en rigurosa cuarentena en una caravana Airstream (Scharf, 2016).

15. Se ha sabido que las bacterias pueden adquirir ADN de su entorno a partir del trabajo de Frederick Griffith en la década de 1920, ratificado por Oswald Avery y sus colegas a principios de la década de 1940. Lo que Lederberg mostró fue que las bacterias podían intercambiarse material genético –lo que se conoce como «conjugación»–. Para información sobre los descubrimientos de Lederberg, véase Lederberg (1952), Sapp (2009), cap. 10, y Gontier (2015a). El ADN viral ha ejercido una influencia profunda en la historia de la vida animal: se cree que los genes virales desempeñaron papeles clave en la evolución de los mamíferos placentarios desde sus antecesores ovíparos (Gontier, 2015a, Sapp 2016).

16. El ADN bacteriano se halla en los genomas de animales (para información general, véase Yong, 2016, cap. 8). El ADN bacteriano y fúngico se halla en los genomas de plantas y algas (Pennisi, 2019b). El ADN fúngico se halla en las algas que forman líquenes (Beck et al., 2015). La transferencia genética horizontal es generalizada en los hongos (Gluck-Thaler y Slot, 2015, Richards et al., 2011, Milner et al., 2019). Al menos, el 8% del genoma humano se inició en los virus (Horie et al., 2010).

17. Para una evolución «provocadora de cortocircuitos» de ADN desconocido en la Tierra, véase Lederberg y Cowie (1958).

18. Para condiciones hostiles en el espacio, véase De la Torre Noetzel et al. (2018).

19. Sancho et al. (2008).

20. Incluso a 18 kilograys de radiación gamma, las muestras del liquen *Circinaria gyrosa* solo sufrieron un 70% de reducción en la actividad fotosintética y a 24 kilograys, se redujo el 95% sin eliminarse por completo (Meeßen et al., 2017). Para contextualizar dichos resultados, uno de los organismos más tolerantes a la radiación documentados hasta la fecha, una arquea (el *Thermococcus gammatolerans*) aislada de las chimeneas hidrotermales del fondo del océano puede tolerar niveles de irradiación gamma superiores a los 30 kilograys (Jolivet et al., 2003). Para un resumen de estudios de líquenes en el espacio, véase Cottin et al. (2017), Sancho et al. (2008) y Brandt et al. (2015); para efectos de altas dosis de irradiación en líquenes, véase Meeßen et al. (2017), Brandt et al. (2017) y De la Torre et al. (2017); para tardígrados en el espacio, véase Jönsson et al. (2008).

21. Algunas disciplinas suelen ‘obtener información’ a través de los líquenes. Los líquenes son tan sensibles a algunas formas de polución industrial que se utilizan como indicadores fiables de la calidad del aire –‘desiertos de líquenes’ se extienden en la dirección del viento en zonas urbanas y se pueden utilizar para mapear la zona afectada por la contaminación industrial–. Hay casos en los que los líquenes ejercen de indicadores en un sentido más literal. Los utilizan los geólogos para determinar la edad de las formaciones rocosas (una disciplina conocida como liquenometría). Y el *litmus*, el tinte de pH sensible utilizado como ‘indicador de papel’ en todos los departamentos de ciencia de las escuelas, procede de un liquen.

22. Un trabajo reciente de Thijs Ettema y su grupo de la Universidad de Uppsala sugiere que los eucariotas crecen dentro de las arqueas. Aún se debate, y mucho, la secuencia exacta de los acontecimientos (Eme et al., 2017). Hace mucho tiempo que se cree que las bacterias no tienen 'orgánulos' o estructuras celulares internas, pero esta visión está cambiando. Muchas bacterias parecen tener estructuras tipo orgánulos que desempeñan funciones especializadas. Para más información, véase Cepelewicz (2019).

23. Margulis (1999); para «intimidad de los desconocidos», véase Mazur (2009).

24. Para «fusión e incorporación», véase Margulis (1996); para orígenes de endosimbiosis, véase Sapp (1994), caps. 4 y 11; para cita de Stanier, véase Sapp (1994), p. 179; para «teoría de endosimbiosis seriada», véase Sapp (1994), p. 174; para bacterias dentro de las bacterias de insectos, véase Bublitz et al. (2019); para el artículo original de Margulis (a nombre de Sagan), véase Sagan (1967).

25. Para la cita de «bastante análogas», véase Sagan (1967); para la cita «ejemplos destacables», véase Margulis (1981), p. 167. Para de Bary, en 1879, la implicación más significativa de simbiosis fue que podía llevar a la novedad evolutiva (Sapp 1994, p. 9). «Simbiogénesis» (convertirse a partir de vivir juntos) fue el término dado al proceso por el que la simbiosis podía originar nuevas especies, término acuñado por sus defensores rusos anteriores, Konstantin Mereschkowsky (1855-1921) y Boris Mikhaylovich Kozo-Polyansky (1890-1957) (Sapp 1994, pp. 47-48). Kozo-Polyansky incluye en su trabajo varias referencias a los líquenes.

> Uno no debería pensar que los líquenes son solo una suma simple de ciertas algas y hongos. En todo caso que tienen muchas características específicas que no están ni en algas ni en hongos [...]. Por todas partes –en su química, su forma, su estructura, su vida, su distribución– el liquen compuesto exhibe nuevos trazos que no son característicos de sus componentes separados. (Kozo-Polyansky, trad. 2010, pp. 55-56)

26. Para citas de Dawkins y Dennett, entre otros, véase Margulis (1996).

27. «El ‘árbol de la vida’ evolutivo parece una metáfora errónea –señaló el genetista Richard Lewontin–. Quizá deberíamos pensar en él como un elaborado trozo de macramé» (Lewontin 2001). El árbol no es la imagen más precisa. Las ramas de algunas especies pueden fusionarse entre sí. Es un proceso conocido como «inosculación», del latín *osculare*, que significa «besar». Solo hay que fijarse en el árbol que se tenga más cerca. Hay más posibilidades de que se ramifique a que se fusione. Las ramas de la mayoría de árboles no son como las hifas de los hongos, que se unen unas con otras en un acto cotidiano. Durante décadas se ha venido discutiendo si el árbol es la metáfora adecuada para la evolución. Hasta el mismísimo Darwin creyó que el «coral de la vida» sería una imagen más precisa aunque, al final, decidiera que «complicaría mucho las cosas» (Gontier 2015b). En el 2009, en una de las ocurrencias más cáusticas sobre la cuestión del árbol, *New Scientist* publicó una edición que anunciaba en su portada que «Darwin se equivocó». *Arrancando el árbol de Darwin*, rezaba la editorial. Como era de prever, desató una respuesta airada (Gontier 2015b). Entre la tormenta de reacciones destaca una carta enviada por Daniel Dennett: «*¿En qué demonios estáis pensando cuando publicáis una portada sensacionalista que pregona que ‘Darwin se equivocó’?*». Pues claro que Dennett estaba enfadado. Darwin no se equivocó, solo planteó su teoría de la evolución antes de que se supiera que existían ADN, genes, uniones simbióticas y transferencia genética horizontal. Dichos descubrimientos nos han permitido transformar nuestra comprensión de la historia de la vida. Pero la tesis central de Darwin de que la evolución procede de la selección natural no se puede rebatir –aunque sí que se le puede discutir que sea la principal fuerza conductora en la evolución (O’Malley, 2015)–. La simbiosis y la transferencia genética horizontal aportan nuevas vías para obtener información nueva; son las nuevas *co-autoras* de la evolución aunque la editora sigue siendo la selección natural. Sin embargo, a la luz de las uniones simbióticas y de la transferencia genética horizontal, muchos biólogos han empezado a reimaginar el árbol de la vida como una malla reticulada formada mientras los linajes se ramifican, fusionan y enmarañan entre sí: una «red», una «trama», un «rizoma», o una «telaraña» (Gontier 2015b, Sapp 2009, cap. 21). Las líneas de estos diagramas se anudan y funden entre sí, conectando diferentes especies, reinos e incluso dominios de la vida. Los lazos se conectan y desconectan del mundo de los virus, entes genéticos que ni siquiera se consideran vivos. Si alguien quería un nuevo organismo colaborador para la evolución, aquí lo tiene. Esta nueva visión de la vida se parece más al micelio de los hongos que a cualquier otra cosa.

28. En algunos líquenes, se forman estructuras especializadas en dispersión llamadas «soredios», compuestas de células de hongos y de algas. En algunos casos, un hongo de liquen recién germinado podría unirse a un fotobionte que apenas satisface sus necesidades, y sobrevivir como una pequeña 'mancha fotosintética' conocida como un «prethallus» hasta la aparición del de verdad (Goward, 2009a). Algunos líquenes pueden desensamblarse y volverse a ensamblar sin producir esporas. Si colocamos ciertos líquenes en una placa de Petri con los nutrientes adecuados, los socios se desenredan y se apartan. Una vez separados, pueden retomar su relación (aunque suele ser imperfecta). En este sentido, los líquenes son reversibles. Por lo menos, en algunos casos, podemos separar la miel de las gachas. Sin embargo, hasta la fecha, solo en el caso de un único liquen –*Endocarpon pusillum*– los socios han sido separados unos de los otros, han crecido aparte, y después se han recombinado para formar todas las etapas del liquen, incluidas las esporas funcionales –conocida como resíntesis espora a espora– (Ahmadjian and Heikkilä, 1970).

29. La naturaleza simbiótica de los líquenes presenta problemas técnicos interesantes. Los líquenes llevan mucho tiempo siendo una pequeña pesadilla para los taxónomos. Y como la situación no ha cambiado, se sigue llamando a los líquenes con el nombre del hongo asociado. Por ejemplo, al liquen que nace de la interacción del hongo *Xanthoria parietina* y del alga *Trebouxia irregularis* se lo conoce como *Xanthoria parietina*. De manera similar, la combinación del hongo *Xanthoria parietina* y del alga *Trebouxia arboricola* se conoce como *Xanthoria parietina*. Los nombres de los líquenes son una sinécdoque, o sea que se refieren al todo con el nombre de una de sus partes (Spribille, 2018). El sistema actual insinúa que el componente fúngico del liquen es el *liquen* pero no es verdad. Los líquenes surgen de una negociación entre varios socios. «Ver los líquenes como hongos –se lamenta Trevor Goward– es perderse ver los líquenes como lo que son» (Goward 2009a). Es como si lo químicos llamaran *carbono* a cualquier compuesto que contiene carbono –desde el diamante al metano o la metanfetamina–. Estarían obligados a admitir que podrían estar perdiéndose algo. Y esto no es solo una queja semántica. Darle nombre a algo es admitir que existe. Cuando se descubre una especie nueva, se la 'describe' y se le da un nombre. Y los líquenes sí tienen nombre, muchos. Los liquenólogos no son ascetas en sentido taxonómico. Es solo que los únicos nombres que pueden darles los aparta del fenómeno que pretenden describir. Es un problema estructural. La biología está construida en torno a un sistema taxonómico que no tiene manera de reconocer el estatus simbiótico de los líquenes. Son innombrables, en sentido literal.

30. Sancho et al. (2008).

31. De la Torre Noetzel et al. (2018).

32. Para compuestos únicos de líquenes y usos humanos, véase Shukla et al. (2010) y *State of the World's Fungi* (2018); para legados metabólicos de relaciones de líquenes, véase Lutzoni et al. (2001).

33. Para un informe de los descubrimientos del Deep Carbon Observatory, véase Watts (2018).

34. Para líquenes en los desiertos, véase Lalley y Viles (2005) y *State of the World's Fungi* (2018); para líquenes alojados dentro de las rocas, véase De los Ríos et al. (2005) y Burford et al. (2003); para los valles secos de McMurdo, véase Sancho et al. (2008); para nitrógeno líquido, véase Oukarroum et al. (2017); para longevidad de los líquenes, véase Goward (1995).

35. Sancho et al. (2008).

36. Para la impacto de la expulsión, véase Sancho et al. (2008) y Cockell (2008). Varios estudios han demostrado que las bacterias son más resistentes a temperaturas altas y presiones de impacto que los líquenes. Para reentrada, véase Sancho et al. (2008).

37. Sancho et al. (2008); Lee et al. (2017).

38. Para orígenes de los líquenes, véase Lutzoni et al. (2018) y Honegger et al. (2012). Hay un intenso debate sobre la identidad de ancestrales fósiles similares a los líquenes y a sus relaciones con los linajes existentes. Se han descubierto organismos marinos similares a los líquenes que tienen 600 millones de años (Yuan et al., 2005), y hay quien argumenta que dichos líquenes marinos tuvieron su papel en el desplazamiento de los antecesores de los líquenes hacia tierra firme (Lipnicki, 2015). Para evolución múltiple de líquenes y *reliquenización*, véase Goward (2009a); para *desliquenización*, véase Goward (2010); para *liquenización* opcional, véase Selosse et al. (2018).

39. Hom y Murray (2014).

40. Para «la canción, y no el cantante», véase Doolittle y Booth (2017).

41. A la *Hydropunctaria maura* se la solía conocer como *Verrucaria maura* (o «noche verrugosa»). Para un estudio exhaustivo de la llegada de líquenes a islas recién creadas, véase el caso de Surtsey: www.anbg.gov.au/lichen/case-studies/surtsey.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

42. Para «todos» y «conjuntos de las partes», véase Goward (2009b).

43. Spribille et al. (2016).

44. Para información sobre la diversidad de hongos en el interior de líquenes, véase Arnold et al. (2009); para socios adicionales en los líquenes de lobo, véase Tuovinen et al. (2019) y Jenkins y Richards (2019).

45. Para «Qué más da cómo las llamen», véase Hillman (2018). Goward ha formulado una definición de liquen teniendo en cuenta estos descubrimientos recientes: «El duradero derivado físico de la *liquenización* definido como un proceso mediante el cual un sistema no lineal con un número no especificado de taxones fúngicos, algares y bacterianos dan lugar a un talo [el cuerpo compartido de los líquenes] visto como una propiedad emergente de sus partes constitutivas» (Goward 2009c).

46. Para líquenes vistos como depósitos de microbios, véase Grube et al. (2015), Aschenbrenner et al. (2016) y Cernava et al. (2019).

47. Para la teoría *queer* (extraña) para los líquenes, véase Griffths (2015).

48. Véase Gilbert et al. (2012) para un análisis más minucioso de cómo los microbios confunden diferentes definiciones de individualidad biológica. Para más información sobre microbios e inmunidad, véase McFall-Ngai (2007) y Lee y Mazmanian (2010). Algunos proponen definiciones alternativas de individuo biológico basadas en el «destino común» del sistema vivo. Por ejemplo, Frédéric Bouchard propone: «Un individuo biológico es un ente integrado funcionalmente cuya integración está vinculada al destino común del sistema cuando se enfrenta a presiones selectivas del entorno» (Bouchard 2018).

49. Gordon et al. (2013); Bordenstein y Theis (2015).

50. Para infecciones causadas por bacterias de los intestinos, véase Van Tyne et al. (2019).

51. Gilbert et al. (2012).

1. Para un breve resumen de estudios clínicos con drogas psicodélicas, véase Winkelman (2017); para información ampliada, véase Pollan (2018).

2. Hughes et al. (2016).

3. Para el momento justo y altura del apretón mortal de las hormigas, véase Hughes et al. (2011) y Hughes (2013); para orientación, véase Chung et al. (2017). Hay muchas especies diferentes de hongos *Ophiocordyceps*, y también de hormiga carpintera pero cada hormiga es huésped de una sola especie de hongo, y cada especie de hongo solo puede controlar una especie de hormiga (De Bekker et al., 2014). Cada apareamiento diferente de hongo-hormiga es exigente cuando elige el lugar de la muerte. Algunos hongos provocan que sus avatares de insecto muerdan en ramitas, otros en la corteza, y otros en las hojas (Andersen et al., 2009, Chung et al., 2017).

4. Para la proporción de hongo en la biomasa de la hormiga, véase Mangold et al. (2019); para visualización de red fúngica dentro de cuerpos de hormigas, véase Fredericksen et al. (2017).

5. Para la hipótesis que la manipulación de los hongos se lleva a cabo por medios químicos, véase Fredericksen et al. (2017); para sustancias químicas producidas por *Ophiocordyceps*, véase De Bekker et al. (2014); para más información de *Ophiocordyceps* y alcaloides de cornezuelo, véase Mangold et al (2019).

6. Para cicatrices en hojas fosilizadas, véase Hughes et al. (2011).

7. Para cita de Mckenna, véase Letcher (2006), p. 258.

8. Schultes et al. (2001), p. 9. Para información más amplia aunque a veces acrítica de intoxicación en el mundo animal, véase Siegel (2005) y Samorini (2002).

9. Para más información sobre la *Amanita muscaria*, véase Letcher (2006), caps. 7-9. Hay quien teoriza que los acusadores en los juicios de Salem a brujas estaban aquejados por ergotismo convulsivo (Caporael, 1976, Matossian, 1982), pero sus argumentos han sido enérgicamente rebatidos por Spanos y Gottleib (1976). Se cree que las visiones y la angustia psico-espiritual provocadas por el cornezuelo, conocidas en la Edad Media y el Renacimiento como el fuego de San Antonio, fueron las que inspiraron las visiones del infierno de la época. Para el Bosco, véase Dixon (1984). También el ganado puede intoxicarse por cornezuelo. «Hierba somnolienta», «hierba borracha» y la «modorra por centeno» deben su nombre a los efectos en reses, caballos y ovejas (Clay, 1988). Los hongos de cornezuelo también tienen potentes efectos medicinales y han sido utilizados durante siglos por las parteras para detener las hemorragias posteriores al parto. Henry Wellcome, el emprendedor cuya donación permitió crear la Wellcome Trust, investigó documentos sobre los efectos medicinales del cornezuelo, el hongo del cereal. Anotó que para las parteras del siglo XVI en Escocia, Alemania y Francia, el cornezuelo «era de remarcable e innegable eficacia» para provocar las contracciones del útero y controlar la hemorragia después del parto. Fue de estas esposas de las hierbas o parteras de quienes los médicos –hombres todos– conocieron las propiedades terapéuticas del cornezuelo, que forman la base del fármaco ergometrina, aún hoy utilizado para tratar las hemorragias fuertes después del parto (Dugan, 2011, pp. 20-21). Fue por su reputación como fármacos obstétricos que Albert Hofmann empezó a investigarlos en los laboratorios Sandoz en la década de 1930, un proyecto de investigación que condujo a la síntesis del LSD en 1938. Para más información de alcaloides del cornezuelo, su historia y usos, véase Wasson et al. (2009), cap. 2: *A Challenging Question and My Answer*.

10. Para más información sobre la historia de la utilización de la seta psilocibina en México, véase Letcher (2006), cap. 5, Schultes (1940) y Schultes et al. (2001), «Little Flowers of the Gods»; para la cita de Sahagún, véase Schultes (1940).

11. Letcher (2006), p. 76.

12. Para McKenna y la pintura rupestre de Tassili, véase McKenna (1992), cap. 6; para más información de McKenna y la pintura de Tassili, véase Metzner (2005), pp. 4243; para más información crítica, véase Letcher (2006), pp. 37-38.

13. Un artículo del 2019 analizó los residuos en un morral hecho con un hocico de zorro hallado en un fardo desenterrado en Bolivia, de más de 1000 años de antigüedad. Los investigadores encontraron trazos de compuestos psicoactivos múltiples –cocaína (de coca), dimetiltriptamina (DMT), harmina y bufotenina, entre otros–. Los análisis proporcionaron pruebas conjeturales de psilocina –un compuesto psicoactivo derivado de la psilocibina– que, de ser cierto, sugeriría que en el fardo ritual había habido setas psilocibinas (Miller et al., 2019). Los Misterios eleusinios –una celebración de Deméter, la diosa del grano y la cosecha, y su hija Perséfone– fueron una de las fiestas religiosas más importantes en la Antigua Grecia. Entre otras cosas, los iniciados bebían una taza de un líquido conocido como *kykeon*. Y después de beberlo se les aparecían fantasmas y vivían estados de euforia y alucinaciones. Muchos afirmaron que la experiencia les había cambiado para siempre (Wasson et al., 2009, cap. 3). Aunque la composición del *kykeon* sigue siendo un secreto celosamente guardado, probablemente fuera un brebaje que alteraba el estado de conciencia –se produjo un escándalo muy sonado cuando se supo que los aristócratas atenienses habían estado bebiendo *kykeon* en casa en veladas con sus invitados (Wasson et al., 1986, p. 155)–. No había listas de invitados para los ritos de Eleusis, de ahí que persistan ciertas dudas sobre quién asistía. Sin embargo, como la mayoría de ciudadanos atenienses eran iniciados, se cree que muchas figuras notables habían asistido, incluidos Eurípides, Sófocles, Píndaro y Esquilo. Platón escribió sobre la experiencia de las iniciaciones al misterio con bastantes detalles en *El banquete* y en *Fedro*, utilizando un lenguaje que se refiere claramente a los ritos en Eleusis (Burkett, 1987, pp. 91-93). Aristóteles no se refirió explícitamente a los misterios en Eleusis pero sí se refirió a las iniciaciones al misterio –una referencia que probablemente encaje con los Misterios eleusinios, dada la importancia de los ritos eleusinios a mediados del siglo IV a.C.–. Hofmann sostenía, junto a Gordon Wasson y Carl Ruck, la hipótesis de que el *kykeon* se elaboraba con cornezuelos que crecían en el grano, purificados de alguna manera para evitar los síntomas espantosos asociados con su consumo accidental (Wasson et al., 2009). Terence McKenna (1992, cap. 8) especuló que los sacerdotes de Eleusis repartían setas psilocibinas. Otros han sugerido un mejunje hecho con adormideras. Hay otros ejemplos de posible utilización de setas en contextos religiosos de la Antigüedad. En Asia central surgió un culto religioso en torno a la utilización de un preparado que alteraba el estado de conciencia llamado «soma», el cual inducía a estados de euforia, y en el Rigveda, un texto antiguo del año 1500 a.C. (aprox.), aparecen cultos dedicados al Sol. Como pasa con el *kykeon*, se desconoce la composición de la bebida. Algunos –sobre todo Gordon Wasson– han argumentado que era la seta roja con topos blancos, la *Amanita muscaria*(para más información, véase Letcher, 2008, cap. 8). Terence McKenna –como siempre– sugirió que las setas psilocibinas eran sus candidatas más probables. Otros han sugerido el cannabis. De todas formas, tampoco hay una prueba inequívoca.

14. Para referencias sobre monstruos de ficción, véase Yong (2017). En el 2018, los investigadores de la Universidad de las Ryukyus, en Japón, descubrieron que varias especies de cigarras habían domesticado hongos *Ophiocordyceps*que vivían en el interior de su cuerpo (Matsuura et al., 2018). Como muchos insectos que se alimentan de savia, las cigarras dependen de bacterias simbióticas para producir varios nutrientes esenciales y vitaminas, sin las cuales no pueden sobrevivir. Pero en algunas especies japonesas de cigarra, una especie de *Ophiocordyceps* ha sustituido a las bacterias. Algo totalmente impensable. Los *Ophiocordyceps* son asesinos despiadadamente efectivos que han perfeccionado sus capacidades a lo largo de decenas de millones de años. E incluso, de alguna manera, en el curso de su larga historia juntos, los *Ophiocordyceps* se han convertido en socios de vida esenciales de las cigarras. Y lo que es más, esto ha ocurrido como mínimo tres veces en tres linajes separados de cigarra. Los *Ophiocordyceps*domesticados sirven para que no olvidemos que la distinción entre microbios 'beneficiosos' y 'parasitarios' no siempre está del todo clara.

15. Para fármacos inmunosupresores, véase *State of the World's Fungi* (2018), «Useful Fungi» (Hongos útiles); para la panacea de la eterna juventud, véase Adachi y Chiba (2007).

16. Coyle et al. (2018); para «el descubrimiento más disparatado», véase //twitter.com/mbeisen/status/1019655132940627969 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

17. Para descripción del comportamiento de moscas infectadas, véase Hughes et al. (2016) y Cooley et al. (2018); para «saleros voladores de la muerte», véase Yong (2018).

18. Para un estudio de Kasson, véase Boyce et al. (2019), y para más información, véase Yong (2018). No es el primer informe que dice que los hongos manipuladores de insectos podrían controlar a sus huéspedes con sustancias químicas que también pueden alterar las mentes humanas; los primos de los hongos *Ophiocordyceps*se consumen con setas psilocibinas en algunas ceremonias indígenas en México (Guzmán et al., 1998).

19. Al parecer, la catinona aumenta la hostilidad en hormigas y podría ser la responsable de la hiperactividad observada en cigarras infectadas (Boyce et al., 2019).

20. Véase Ovidio (1958), p. 186; para chamanismo en el Amazonas, véase Viveiros de Castro (2004); para el pueblo yukaguir, véase Willerslev (2007).

21. Para «hongo con ropa de hormiga», véase Hughes et al. (2016). La neuromicrobiología es un campo relativamente nuevo, y el entendimiento de la influencia de la flora intestinal en comportamientos animales, cognición y estados psicológicos sigue siendo desigual (Hooks et al., 2018). Sin embargo, han aparecido algunos patrones. Por ejemplo, los ratones necesitan, para empezar, una saludable microflora intestinal para desarrollar un sistema nervioso operativo (Bruce-Keller et al., 2018). Si uno elimina el microbioma de ratones jóvenes antes de tener la posibilidad de desarrollar un sistema nervioso operativo, devienen defectos cognitivos, entre ellos, problemas de memoria y dificultad para identificar objetos (De la Fuente-Nunez et al., 2017). Las pruebas más espectaculares vienen de estudios que intercambian microbiotas entre diferentes líneas de ratones. Cuando se hacen trasplantes fecales de cepas 'normales' a cepas 'tímidas' de ratón, pierden su sentido de precaución. Igualmente, si se inoculan microbios de cepas 'tímidas' en cepas 'normales', adquieren una «precaución e indecisión innecesarias» (Bruce-Keller et al., 2018). Las diferencias en microbiotas intestinales afectan la capacidad de los ratones para olvidar la experiencia del dolor (Pennisi, 2019a, Chu et al., 2019). Muchos microbios intestinales producen sustancias químicas que influyen en la actividad del sistema nervioso, incluidos los neurotransmisores y los ácidos grasos de cadena corta (SCFA). Más del 90% de la serotonina de nuestros cuerpos –el neurotransmisor que, cuando abunda, nos hace sentir felices, y cuando merma nos hace sentir tristes– se produce en nuestros intestinos, y la flora intestinal desempeña un importante papel en regular su producción (Yano et al., 2015). Dos estudios han investigado el efecto de trasplantar la microbiota fecal de pacientes humanos deprimidos a ratones y ratas esterilizados. Los animales desarrollaron una patología depresiva que incluía ansiedad y desinterés en comportamientos satisfactorios. Estos estudios sugieren que no solo puede desajustar la microbiota intestinal resultando en depresión, sino que los mismos desajustes pueden ser los responsables del comportamiento deprimido en ratones y seres humanos (Zheng et al., 2016, Kelly et al., 2016). Más estudios en seres humanos han demostrado que ciertos tratamientos probióticos pueden reducir los síntomas de depresión, ansiedad y pensamientos negativos (Mohajeri et al., 2018, Valles-Colomer et al., 2019). Sin embargo, una industria multimillonaria de probióticos sobrevuela el campo de la neuromicrobiología y se ha dedicado a proclamar a bombo y platillo dichos descubrimientos, según han denunciado algunos investigadores. Las comunidades intestinales son complejas y manipularlas es un reto. Hay tantas variables implicadas que pocos estudios son capaces de identificar vínculos causales entre la acción de microbios específicos y comportamientos específicos (Hooks et al., 2018).

22. Para una exposición completa del «fenotipo extendido», véase Dawkins (1982); para «especulación firmemente limitada», véase Dawkins (2004); para más información sobre la manipulación fúngica en el comportamiento del insecto en términos de fenotipos extendidos, véase Andersen et al. (2009), Hughes (2013 and 2014) y Cooley et al. (2018).

23. Para más información sobre la ‘primera hornada’ de investigación psicodélica en las décadas de 1950 y 1960, véase Dyke (2008) y Pollan (2018), cap. 3.

24. Para el estudio de la Johns Hopkins, véase Griffiths et al. (2016); para el estudio de la Universidad de Nueva York, véase Ross et al. (2016); para la entrevista con Griffiths, véase *Fantastic Fungi: The Magic Beneath Us*, dirigida por Louis Schwartzberg; para información general que incluye los récords de los «efectos del tratamiento», véase Pollan (2018), cap. 1.

25. Para un estudio de la experiencia mística provocada por la psilocibina, véase Griffiths et al. (2008); para el papel que desempeña el asombro en psicoterapia asistida por psicodélicos, véase Hendricks (2018).

26. Para el papel de la psilocibina en tratamientos para la adicción al tabaco, véase Johnson et al. (2014, 2015); para la ‘abertura’ y plenitud de vivir inducidas por la psilocibina, véase MacLean et al. (2011); para información general del papel de los psicodélicos en el tratamiento de la adicción, véase Pollan (2018), cap. 6, pto. 2; para sensación de conexión con el mundo natural, véase Lyons y Carhart-Harris (2018) y Studerus et al. (2011). Las comunidades nativas americanas hace mucho tiempo que utilizan el cactus peyote alucinógeno para tratar el alcoholismo. Entre las décadas de 1950 y 1970, se investigó la posibilidad de usar psilocibina y LSD para tratar la adicción a las drogas. Algunos estudios revelaron efectos positivos. En el 2012, un meta análisis aportó datos de ensayos controlados con mayor rigor. Reveló que una única dosis de LSD tuvo un efecto beneficioso durante seis meses en alguien que abusaba del alcohol (Krebs y Johansen 2012). En un sondeo en línea diseñado para investigar la ‘ecología natural’ del fenómeno, Matthew Johnson y sus colegas (2017) analizaron los informes de más de 300 pacientes que dijeron que fumaban menos o ya no fumaban después de una experiencia con psilocibina o LSD.

27. Para «habían empezado siendo tremendamente materialistas y ateos», véase Pollan (2018), cap. 4; para realidad no material en la que se basa la creencia religiosa, véase Pollan (2018), cap. 2. Incluso los cuidadores que guían y observan las sesiones en la Johns Hopkins han informado de cambios inesperados en su visión del mundo. Un guía que había vigilado docenas de sesiones con psilocibina describió su experiencia:

> Empecé siendo muy escéptico pero comencé a ver cosas a diario en mi trabajo que no encajaban con lo que creía. Mi mundo empezó a ser más y más misterioso cuando me sentaba con pacientes tratados con psilocibina. (Pollan, 2018, cap. 1)

28. Para la influencia de psicodélicos en el crecimiento y arquitectura de neuronas, véase Ly et al. (2018).

29. Para psilocibina y RND, véase Carhart-Harris et al. (2012) y Petri et al. (2014); para efectos del LSD en la conectividad cerebral, véase Carhart-Harris et al. (2016b).

30. Para cita de Hoffer, véase Pollan (2018), cap. 3.

31. Para cita de Johnson, véase Pollan (2018), cap. 6; para el papel de la psilocibina en el tratamiento del «pesimismo rígido» de la depresión, véase Carhart-Harris et al. (2012).

32. Para más información sobre la disolución del ego y la ‘fusión’, véase Pollan (2018), prólogo, cap. 5.

33. Para «noche fría de la mente» y «barrocas», véase McKenna y McKenna (1976), pp. 8-9.

34. Para cita de Whitehead, véase Russell (1956), p. 39; para la especulación de «firmemente restringida», véase Dawkins (2004).

35. No se sabe cuándo pasaron a ser ‘mágicas’ las primeras setas. Lo más fácil sería asumir que la capacidad para crear psilocibina se produjo en el más reciente antecesor común a todos los hongos que hacen psilocibina. Sin embargo, esto no funciona porque:

> la psilocibina ha sido transferida horizontalmente entre linajes fúngicos (Reynolds et al., 2018), y la biosíntesis de la psilocibina se ha desarrollado más de una vez (Awan et al., 2018).

Jason Slot, un investigador de la Universidad Estatal de Ohio, estimó que se produjo hace 75 millones de años, basándose en la hipótesis de que los genes necesitaban hacer psilocibina agrupados primero en un antecesor de los géneros *Gymnopilus* y *Psilocybe*. Slot sospecha que este fue el caso porque se había demostrado que los otros sucesos del grupo de genes de psilocibina habían aparecido mediante la transferencia genética horizontal.

36. Para transferencia genética horizontal del grupo de genes de psilocibina, véase Reynolds et al. (2018); para orígenes múltiples de biosíntesis de psilocibina, véase Awan et al. (2018).

37. Algunas relaciones entre insectos y hongos desarrollaron una manipulación más ambigua, como los ‘hongos cuco’, que se aprovechan del comportamiento social de las termitas al producir pequeñas pelotas que parecen huevos de termita, y producen una feromona que se halla en los huevos de verdad de las termitas. Estas llevan los huevos falsos hasta el nido, donde los cuidan. Cuando no consiguen germinarlos, tiran los huevos falsos a pilas de desechos. Rodeados de compost rico en nutrientes, los ‘hongos cuco’ brotan y pueden vivir libres, sin la competencia de otros hongos (Matsuura et al., 2009).

38. Para hormigas cortadoras de hojas que buscan setas psilocibinas para comer, véase Masiulionis et al. (2013); para jejenes y otros insectos que comen setas psilocibinas, y la hipótesis de ‘señuelo’ de la psilocibina, véase Awan et al. (2018). La psilocibina cristalina pura es cara y no es fácil investigar con ella porque las leyes son muy estrictas. Hay pruebas que indican que la psilocibina obstaculiza el comportamiento de insectos y demás invertebrados. En la década de 1960, unos investigadores suministraron drogas a arañas para estudiar las telas que hilaban. La psilocibina en dosis altas impedía que las hilaran. Y en dosis bajas, las arañas hilaron telas flojas pero se comportaban como «si fueran más resistentes». En cambio, con LSD, las arañas tejieron telas «atípicamente normales» (Witt, 1971). Más recientes son los estudios que han descubierto que las moscas de la fruta a las que se ha suministrado metitepina, una sustancia química que bloquea los receptores de serotonina que la psilocibina estimula, perdieron su apetito. Esto ha llevado a algunos a sugerir que la psilocibina quizá *aumenta* el apetito de las moscas –posiblemente para que dispersen las esporas de los hongos (Awan et al., 2018)–. Michael Beug, un bioquímico y micólogo del Evergreen State College, es uno de los investigadores que rebate la hipótesis de la psilocibina como disuasivo. Las setas son un fruto. De la misma manera que un manzano hace que su fruta sea llamativa para facilitar la dispersión de sus semillas, los hongos producen setas para facilitar la dispersión de sus esporas. La psilocibina, asevera Beug, se encuentra en altas concentraciones en setas de especies productoras de psilocibina pero en cantidades insignificantes en el micelio de la mayoría de especies productoras de psilocibina (aunque no en todas: el *Psilocybe caerulescens* y el *Psilocybe hoogshagenii/semperviva*tienen micelios con concentraciones significativas de psilocibina). Aun así, es el micelio, no las setas, el que tiene más necesidad de defensas. ¿Por qué deberían las setas psilocibinas meterse en problemas por defender sus frutos mientras dejan desprotegidos a sus micelios (Pollan, 2018, cap. 2)?

39. Se sabe que otros mamíferos, también, comen especies de seta psilocibina sin sufrir efectos adversos. Michael Beug, el bioquímico y micólogo a cargo de los informes de intoxicación que dirige con la North American Mycological Association, ha recibido muchos de dichos casos. «Con caballos o vacas, puede o no ser accidental», me dijo Beug. No obstante, había casos que parecía que los animales los buscaran. «Algunos perros ven a sus dueños recogiendo setas psilocibinas y se interesan; y después comen las setas una y otra vez provocándoles efectos que resultan familiares al observador humano». Una sola vez vio un informe sobre un gato, «que comió setas repetidamente y parecía estar bastante *ensetado*».

40. Schultes (1940).

41. Para más información sobre el artículo de Wasson en la revista *Life* y su alcance, véase Pollan (2018), cap. 2, y Davis (1996), cap. 4.

42. Para «siguiendo a nuestra madre», véase McKenna (2012). Posiblemente *la* primera crónica de un *trip* en un medio muy leído lo escribió el periodista Sidney Katz, quien publicó un artículo en la popular revista canadiense *Maclean* titulado «My Twelve Hours as a Madman» (Mis 12 horas como un loco). Para más información, véase Pollan (2018), cap. 3.

43. Para más información sobre el «viaje visionario» de Leary y el Harvard Psilocybin Project, véase Letcher (2006), pp. 198-201 y Pollan (2018), cap. 3. Para cita de Leary, véase Leary (2005).

44. Letcher (2006), pp. 201, 254-255; Pollan (2018), cap. 3.

45. Para más información sobre el creciente interés en setas mágicas, véase Letcher (2006), cap. 13, *Underground, Overground*; para más información sobre técnicas de cultivo más nuevas, véase Letcher (2006), cap. 15, *Muck and Brass*; para una guía del cultivador, véase McKenna y McKenna (1976).

46. Para más información sobre *The Mushroom Cultivator*, y los lugares holandeses e ingleses de setas mágicas, véase Letcher (2006), cap. 15, *Muck and Brass*.

47. En los pastos de Centroamérica, las setas crecen sin más y no hay nada que indique que la gente las cultiva.

48. Para liquen que contiene psilocibina, véase Schmull et al. (2014); para distribución mundial de setas psilocibinas, véase Stamets (1996, 2005); para «se dan en abundancia», véase Allen y Arthur (2005); para un informe del descubrimiento de setas psilocibinas en todo el mundo, véase Letcher (2006), pp. 221-225; para «parques, complejos residenciales...», véase Stamets (2005).

49. Schultes et al. (2001), p. 23.

50. Véase James (2002), p. 300.

1. Para evolución de las plantas terrestres, véase Lutzoni et al. (2018), Delwiche y Cooper (2015), y Pirozynski y Malloch (1975); para biomasa vegetal, véase Bar-On et al. (2018).

2. Para primeras cortezas biológicas, véase Beerling (2019), p. 15, y Wellman y Strother (2015); para vida en el Ordovícico, véase: web.archive.org/web/20071221094614/http://www.palaeos.com/Paleozoic/Ordovician/Ordovician.htm#Life [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

3. Para incentivos de vida en tierra firme para las antecesoras de las plantas, véase Beerling (2019), p. 155. Quizá, como no podía ser de otra manera, no siempre ha habido consenso sobre este tema. Los primeros en proponer la idea fueron Kris Pirozynski y David Malloch en 1975 en su artículo «El origen de las plantas terrestres: una cuestión de ‘micotrofismo’». En él afirmaban que «las plantas terrestres nunca tuvieron ninguna independencia [de los hongos], porque si la hubieran tenido, nunca podrían haber colonizado la tierra». En la época fue una idea transgresora porque planteó que la simbiosis había sido una fuerza importante en uno de los desarrollos evolutivos más significativos en la historia de la vida. Lynn Margulis se sumó a esta idea y describió la simbiosis como «la luna que sube la marea de la vida desde sus profundidades oceánicas hasta tierra firme y el aire»(Beerling 2019, pp. 126-127). Para más información sobre hongos y su papel en la evolución de las plantas terrestres, véase Lutzoni et al. (2018), Hoysted et al. (2018), Selosse et al. (2015) y Strullu-Derrien et al. (2018).

4. Para proporción de especies vegetales que establecen asociaciones micorrícicas, véase Brundrett y Tedersoo (2018). El 7% de las especies de plantas terrestres que no forman asociaciones micorrícicas han desarrollado estrategias alternativas, como parasitismo o carnivorismo. Esta cifra puede ser menor al 7%: estudios recientes revelan que las plantas que siempre se han considerado «no-micorrícicas» –como las de la familia del repollo– establecen relaciones con hongos no-micorrícicos que benefician a la planta como hacen las asociaciones micorrícicas (Van der Heijden et al., 2017, Cosme et al., 2018, Hiruma et al., 2018).

5. Para hongos en macroalgas –«micoficobiosis»–, véase Selosse y Tacon (1998); para «bolas verdes blandas», véase Hom y Murray (2014).

6. Se cree que las hepáticas fueron el primer linaje de plantas terrestres, hace más de 400 millones de años. Las hepáticas de los géneros *Treubia* y *Haplomitrium* nos pueden ilustrar sobre las primeras plantas en tierra firme (Beerling 2019, p. 25). Aparte de los fósiles, hay bastantes líneas de investigación. El sistema genético responsable de las señales químicas usadas por las plantas para comunicarse con los hongos micorrícicos es idéntico en todos los grupos vegetales, dando a entender que estaba en los antecesores comunes de todas las plantas (Wang et al., 2010, Bonfante y Selosse, 2010, Delaux et al., 2015). Los antecesores de las primeras plantas terrestres que sobreviven –las hepáticas– forman relaciones con los linajes más antiguos de hongos micorrícicos (Pressel et al., 2010). Es más, las estimaciones más recientes sobre «el momento justo» apuntan que los hongos pasaron a tierra firme antes que las antecesoras de las actuales plantas terrestres, o sea que habría sido casi imposible que las primeras plantas no se hubieran encontrado con hongos (Lutzoni et al., 2018).

7. Para evolución de raíces, véase Brundrett et al. (2002) y Brundrett y Tedersoo (2018).

8. Para evolución de raíces más finas y oportunistas, véase Ma et al. (2018). El diámetro de las raíces finas varía, pero suele ser de entre 100 y 500 micrómetros. En uno de los linajes más ancestrales de hongos micorrícicos –los hongos micorrícicos arbusculares– las hifas destinadas al transporte son de 20-30 micrómetros de diámetro, y sus finas hifas de absorción, de 2-7 micrómetros (Leake et al., 2004).

9. Para «entre una tercera parte y la mitad de la biomasa del suelo terrestre», véase Johnson et al. (2013); para estimaciones sobre la longitud de hongos micorrícicos en los 10 cm superficiales del suelo, véase Leake y Read (2017). Estas estimaciones se basan en las longitudes del micelio micorrícico hallado en diferentes ecosistemas, y tienen en cuenta el tipo de micorriza y de utilización de la tierra. Los datos proceden de Leake et al. (2004).

10. Para el trabajo de Frank sobre hongos micorrícicos, véase Frank (2005); para más información sobre las investigaciones de Frank, véase Trappe (2005).

11. Uno de los críticos que se mostró más duro con Frank fue el botánico y, más tarde, decano de la Harvard Law School, Roscoe Pound, que definió sus propuestas como «decididamente penosas». Pound se posicionó junto a los autores más ‘sobrios’, quienes sostenían que los hongos micorrícicos eran «probablemente perjudiciales al arrebatar los nutrientes que pertenecían propiamente al árbol». «En todos los casos –vociferó Pound– la simbiosis resulta ventajosa a una de las partes, y nunca podemos estar seguros de si la otra no hubiera sido tan rica si se la hubiera dejado sola» (Sapp, 2004).

12. Para descripción de los experimentos de Frank, véase Beerling (2019), p. 129.

13. Tolkien (2014): para «Para ti, pequeño jardinero...», véase Vol. II, cap. 8: *Adiós a Lórien*; para «Sam Gamyi plantó...», véase Vol. III, cap. 9: *La última deliberación*.

14. Para la rápida evolución en el Devónico, véase Beerling (2019), pp. 152, 155; para descenso en dióxido de carbono, véase Johnson et al. (2013) y Mills et al. (2017). Hay hipótesis alternativas que consideran los desencadenantes de la disminución de dióxido de carbono en la atmósfera. Por ejemplo, el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero son emitidos por el vulcanismo y otros efectos de la actividad tectónica. Si las emisiones de dióxido de carbono de los volcanes descienden, entonces el dióxido de carbono de la atmósfera también bajará, provocando potencialmente un período de enfriamiento global (McKenzie et al., 2016).

15. Para asistencia micorrícica al auge de las plantas en el Devónico, véase Beerling (2019), p. 162; para más información sobre el desgaste teniendo en cuenta la actividad micorrícica, véase Taylor et al. (2009).

16. Mills utilizó el modelo COPSE (Carbono, Oxígeno, Fósforo, Azufre y Evolución), que examina el ciclo de todos estos elementos en largos períodos de tiempo evolutivo en relación con una «representación simplificada de la biota terrestre, la atmósfera, los océanos y los sedimentos» (Mills et al., 2017).

17. Mills et al. (2017); para los experimentos de Katie Field sobre respuestas micorrícicas a climas pretéritos, véase Field et al. (2012).

18. Para información general sobre la evolución micorrícica, véase Brundrett y Tedersoo (2018). Se cree que el grupo de hongos que ayudó a las plantas a salir a tierra firme y a fructificar en praderas y bosques tropicales –hongos micorrícicos arbusculares– solo han evolucionado una vez. Los hongos micorrícicos arbusculares son los que crecen en los lóbulos ligeros de las células vegetales. El tipo dominante en bosques templados –hongos ectomicorrícicos– ha aparecido en más de 60 ocasiones sueltas (Hibbett et al., 2000). Estos hongos –entre ellos, las trufas– se tejen a sí mismos en las fundas del micelio en torno a los ápices de la raíz vegetal, tal y como Frank observó a finales del siglo XIX. Las orquídeas tienen una relación micorrícica particular, con su propia historia evolutiva. Igual que las plantas de la familia del arándano, o *Ericaceae* (Martin et al., 2017). Katie Field y sus colegas están estudiando un grupo de hongo micorrícico (el *Mucoromycotina*) totalmente diferente que se descubrió a finales de la década del 2000. Se da en todo el reino vegetal y se cree que es tan antiguo como las primeras plantas terrestres pero había pasado totalmente desapercibido pese a décadas de estudio. Seguramente había estado mucho más escondido a simple vista (Van der Heijden et al., 2017, Cosme et al., 2018, Hiruma et al., 2018, Selosse et al., 2018).

19. Para experimentos con fresas, véase Orrell (2018); para un estudio más exhaustivo sobre la influencia de los hongos micorrícicos en interacciones entre planta y polinizador, véase Davis et al. (2019).

20. Para albahaca, véase Copetta et al. (2006); para tomates, véase Copetta et al. (2011) y Rouphael et al. (2015); para menta, véase Gupta et al. (2002); para lechuga, véase Baslam et al. (2011); para alcachofas, véase Ceccarelli et al. (2010); para hierba de San Juan y equinácea, véase Rouphael et al. (2015); para pan, véase Torri et al. (2013).

21. Rayner (1945).

22. Para la función social del intelecto, véase Humphrey (1976).

23. Para «recompensas recíprocas», véase Kiers et al. (2011). Kiers y sus colegas pudieron ser tan precisos porque ella utilizó un sistema artificial. Las plantas no eran plantas normales sino «cultivos de órganos» de raíz –raíces incorpóreas que crecen sin brotes ni hojas–. Sin embargo, la capacidad de plantas y hongos de transferir nutrientes o carbono preferentemente a socios más favorables ha sido demostrada con plantas enteras que crecen en el suelo (Bever et al., 2009, Fellbaum et al., 2014, Zheng et al., 2015). No se acaba de entender cómo las plantas y los hongos son capaces de regular estos flujos pero parece ser una característica general de la relación (Werner y Kiers, 2015).

24. No todas las especies de plantas y hogos controlan su intercambio de la misma manera. Algunas especies vegetales heredan una capacidad para suministrar preferentemente carbono a socios fúngicos favorables. Y las hay que no tienen este talento (Grman, 2012). Hay plantas que dependen más de sus socios fúngicos que otras. Algunas especies, como las que producen ‘semillas de polvo’, no germinarán sin que haya un hongo presente; muchas plantas lo harán. Algunas plantas no dan nada a cambio al hongo cuando son jóvenes pero empiezan a recompensarlo cuando son mayores, una tendencia que Katie Field llama la estrategia del «tomo ahora, pago luego» (Field et al., 2015).

25. Para un estudio sobre la desigualdad de ingresos, véase Whiteside et al. (2019).

26. Kiers y sus colegas midieron la velocidad de transporte por la red, observando velocidades máximas de más de 50 micrómetros por segundo –unas 100 veces más rápido que la difusión pasiva– pero también cambios regulares, u oscilaciones, en la dirección del flujo por la red (Whiteside et al., 2019).

27. Para el papel que desempeña el contexto en las asociaciones micorrícicas, véase Hoeksema et al. (2010) y Alzarhani et al. (2019); para el impacto del fósforo en la 'exigencia' de las plantas, véase Ji y Bever (2016). Incluso en especies vegetales y fúngicas, hay muchas variaciones entre el comportamiento de cada individuo de planta y de hongo (Mateus et al., 2019).

28. Para un cálculo estimado de árboles en la Tierra, véase Crowther et al. (2015).

29. Para más información sobre los vacíos de conocimiento en la investigación micorrícica, véase Lekberg y Helgason (2018).

30. Para más información sobre el intercambio de plantas y hongos y cómo se controla, véase Wipf et al. (2019). En un estudio, un solo hongo conectado a la vez con dos especies vegetales distintas –lino y sorgo– daba más nutrientes al lino aunque el sorgo diera más carbono al hongo. Si nos basáramos en un análisis de coste-beneficio, esperaríamos que el hongo suministrara más nutrientes al sorgo (Walder et al., 2012; véase también Hortal et al., 2017). Hay plantas que lo llevan al extremo y no proporcionan nada de carbono a sus socios micorrícicos. En estos casos, el intercambio entre socios no parece estar basado en un ojo por ojo de recompensas recíprocas. Claro que puede haber muchos beneficios y costes que no se están teniendo en cuenta, pero es difícil medir tantas variables a la vez. Por esta razón, casi todos los estudios prefieren concentrarse en pocos parámetros y fáciles de manejar, como el carbono y el fósforo. Estos estudios nos proporcionan detalles para hilar fino pero nos dificultan extrapolar los descubrimientos a complejos escenarios del mundo real (Walder y Van der Heijden, 2015, Van der Heijden y Walder, 2016).

31. Para influencia de hongos micorrícicos en dinámicas de los bosques a escala continental, véase Phillips et al. (2013), Bennett et al. (2017), Averill et al. (2018), Zhu et al. (2018), Steidinger et al. (2019) y Chen et al. (2019); para migración de los árboles tras la retirada del casquete glaciar Laurentino, véase Pither et al. (2018).

32. Para un estudio de la Universidad de Columbia Británica, véase Pither et al. (2018) y comentarios de Zobel (2018); para un estudio sobre la intrusión de plantas arbitrada por micorrizas páramos, véase Collier y Bidartondo (2009); para migración conjunta de plantas y sus socios micorrícicos, véase Peay (2016).

33. Rodríguez et al. (2009).

34. Osborne et al. (2018), con comentarios de Geml y Wagner (2018).

35. Para involución, véase Hustak y Myers (2012).

36. Para más información sobre el papel de las relaciones planta-hongo para adaptarse al cambio climático, véase Pickles et al. (2012), Giauque y Hawkes (2013), Kivlin et al. (2013), Mohan et al. (2014), Fernández et al. (2017) y Terrer et al. (2016); para «alarmante deterioro», véase Sapsford et al. (2017) y van der Linde et al. (2018). Las relaciones micorrícicas pueden modelar la superficie terrestre de bastantes maneras, por ejemplo influyendo en los ciclos de los nutrientes del suelo; y hay quien piensa en ellos como sistemas climáticos químicos. El 'clima' químico establecido por diferentes tipos de hongos ayuda a determinar qué tipo de plantas crecen y dónde. La influencia de diferentes plantas, a cambio, repercute en el comportamiento de los hongos micorrícicos. Los hongos arbusculares micorrícicos (AM) –el antiguo linaje que crece en las células de las plantas– guían los sistemas climáticos químicos en una dirección totalmente diferente que los hongos ectomicorrícicos (EM) –el tipo que ha evolucionado muchas veces y crece alrededor de las raíces vegetales en un manto de micelio–. A diferencia de los hongos AM, los hongos EM descienden de los hongos descomponedores de vida libre. Como resultado, son mejores en descomponer materia orgánica que los hongos arbusculares micorrícicos. A una escala de ecosistema, marcan una gran diferencia. Los hongos EM prosperan en climas más fríos donde la descomposición es más lenta. Los AM prosperan en climas más cálidos y húmedos, donde la descomposición es más rápida. Los EM suelen competir con descomponedores de vida libre y reducir el ritmo de los ciclos de carbono. Los AM suelen fomentar la actividad de descomponedores de vida libre y aumentar el ritmo de los ciclos de carbono. Los EM permiten una mayor inmovilización de carbono en las capas superficiales del suelo. Los AM permiten una mayor filtración de carbono a las capas inferiores del suelo donde se queda inmovilizado (Phillips et al., 2013, Craig et al., 2018, Zhu et al., 2018, Steidinger et al., 2019). Las relaciones micorrícicas también pueden influir en cómo interactúan las plantas. En algunas situaciones, los hongos micorrícicos aumentan la diversidad vegetal al reducir las interacciones competitivas entre plantas, permitiendo que especies de plantas menos dominantes se instalen (Van der Heijden et al., 2008, Bennett y Cahill, 2016, Bachelot et al., 2017, Chen et al., 2019). En otras situaciones, reducen la diversidad permitiendo a las plantas excluir a los competidores. En algunos casos, los *feedbacks* de las plantas a las comunidades micorrícicas duran generaciones, de ahí que se los llame a veces «efectos heredados» (Mueller et al., 2019). Un estudio sobre los efectos de los mortíferos escarabajos del pino de montaña en la costa oeste de Norteamérica reveló que la supervivencia de los pinos jóvenes de semillero variaba según la procedencia de sus comunidades micorrícicas. Si crecían con hongos micorrícicos de zonas donde los pinos adultos habían sido aniquilados por los escarabajos, los pinos de semillero tenían índices más altos de mortalidad. Las comunidades micorríccias permitieron que los efectos de los escarabajos del pino traspasaran a generaciones de árboles (Karst et al., 2015).

37. Para «alianza...», véase Howard (1945), cap. 2; para «hilos fungosos vivos», véase Howard (1945), cap. 1; para «¿puede la humanidad regular...?», véase Howard (1940), cap. 1.

38. Para duplicar la producción de cultivos, véase Tilman et al. (2002); para emisiones agrícolas y estancamiento de rendimientos de cosechas, véase Foley et al. (2005) y Godfray et al. (2010); para disfunción del empleo de fertilizante de fósforo, véase Elser y Bennett (2011); para pérdida de cosechas, véase King et al. (2017); para 30 campos de fútbol, véase Arsenault (2014); para saber cuántas cosechas quedan por cultivar en el Reino Unido, véase van der Zee (2017); para pronósticos sobre la demanda global de alimentos, véase Tilman et al. (2011).

39. Para un estudio de las prácticas agrícolas tradicionales en China, véase King (1911); para la preocupación de Howard sobre la «vida en el suelo», véase Howard (1940); para el daño de la arquitectura a las comunidades microbianas del suelo, véase Wagg et al. (2014), de Vries et al. (2013) y Toju et al. (2018).

40. Para el estudio de la Agroscope, véase Banerjee et al. (2019); para el impacto de la labranza en comunidades micorrícicas, véase Helgason et al. (1998); para comparación de prácticas ecológicas y no ecológicas en comunidades micorrícicas, véase Verbruggen et al. (2010), Manoharan et al (2017) y Rillig et al. (2019).

41. Para «ingenieros del ecosistema», véase Banerjee et al. (2018); para el papel de los hongos micorrícicos en la estabilidad del suelo, véase Leifheit et al. (2014), Mardhiah et al. (2016), Delavaux et al. (2017), Lehmann et al. (2017), Powell y Rillig (2018) y Chen et al. (2018); para impacto de los hongos micorrícicos en la absorción de agua por parte del suelo, véase Martínez-García et al. (2017); para carbono almacenado en el suelo, véase Swift (2001) y Scharlemann et al. (2014); para análisis del carbono del suelo adherido a los hongos, véase Clemmensen et al. (2013) y Lehmann et al. (2017); para una estimación del número de organismos en el suelo, véase Berendsen et al. (2012); para una estimación del número de personas que han vivido en la Tierra, véase www.prb.org/howmanypeoplehaveeverlivedonearth/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

42. Para el impacto de los hongos micorrícicos en la resistencia de las plantas al estrés, véase Zabinski y Bunn (2014); Delavaux et al. (2017), Brito et al. (2018), Rillig et al. (2018) y Chialva et al. (2018). Otros estudios han descubierto que al inocular cultivos con los hongos endófitos que viven en los brotes de las plantas, pueden aumentar espectacularmente la tolerancia de los cultivos a la sequía y el calor (Redman y Rodriguez, 2017).

43. Para resultados impredecibles de asociaciones micorrícicas en los rendimientos de cultivos, véase Ryan y Graham (2018) (pero véase también Rillig et al., 2019 y Zhang et al., 2019); para los estudios de Katie Field sobre las reacciones de los cultivos a los hongos micorrícicos, véase Thirkell et al. (2017); para variabilidad de la reacción micorrícica entre variedades de cultivos, véase Thirkell et al. (2019).

44. Para más información sobre la eficacia de los productos micorrícicos que se comercializan, véase Hart et al. (2018) y Kaminsky et al. (2018). Cada vez hay más productos que utilizan hongos endófitos de plantas para proteger cultivos. En el 2019, la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos aprobó un pesticida fúngico diseñado para que las abejas lo depositaran en las plantas (Fritts 2019).

45. Para el enfoque de Kiers, véase Kiers y Denison (2014).

46. Para «una explicación científica completa», véase Howard (1940), cap. 11.

47. Bateson (1987), cap. 4.94; Merleau-Ponty (2002), pto. 1, cap. 3, *The Spatiality of One’s Own Body and Motility*.

1. El botánico ruso fue F. Kamienski, quien publicó su teoría sobre las *Monotropa* en 1882 (Trappe, 2015); para el ensayo con azúcar radioactivo, véase Björkman (1960).

2. Para más información sobre la «tela reticular enmarañada» de Humboldt, véase Wulf (2015), cap. 18, *Humboldt's Cosmos*.

3. Para el ensayo de Read con dióxido de carbono radioactivo, véase Francis y Read (1984). En 1988, E. I. Newman, el autor de un análisis clásico sobre la materia de las redes micorrícicas compartidas, comentó que «si este fenómeno es extendido, podría tener grandes consecuencias para el funcionamiento de ecosistemas». Newman identificó cinco rutas por las que las redes micorrícicas compartidas podrían impactar:

1) Las plántulas pueden pasar a estar conectadas a una red de hifas más grande y empezar a beneficiarse de ella en una fase temprana.
2) Una planta puede recibir materiales orgánicos (como carbohidratos) de otra planta vía enlaces hifales, quizá suficientes para aumentar el crecimiento de la receptora y la posibilidad de supervivencia.
3) El equilibrio competitivo entre plantas se puede descompensar si obtienen nutrientes minerales de una red de micelio común en lugar de si cada individuo los obtiene del suelo.
4) Los nutrientes minerales pueden pasar de una planta a otra reduciendo así, quizá, la dominancia competitiva.
5) Los nutrientes liberados por las raíces moribundas pueden pasar directamente por los enlaces hifales hasta las raíces vivas, sin ni siquiera entrar en la solución del suelo.

4. Simard et al. (1997). Simard cultivó plántulas de tres especies de árbol en un bosque de la provincia canadiense de Columbia Británica. Dos de las especies –abedul blanco y abeto de Douglas– establecen relaciones con el mismo tipo de hongo micorrícico. La tercera –cedro rojo occidental– establece relaciones con un tipo de hongo micorrícico no emparentado. O sea que Simard podía asegurar que el abedul y el abeto compartían una red mientras que el cedro únicamente compartía el espacio de las raíces sin conexiones fúngicas directas –aunque este planteamiento no demuestra que las plantas sigan sin conectar, un aspecto por el que su estudio fue más tarde criticado–. En un giro importante de las investigaciones previas de Read, Simard expuso parejas de plántulas de árbol a dióxido de carbono y las marcó con dos isótopos radioactivos diferentes de carbono. Con un solo isótopo es imposible seguir el movimiento *bidireccional* del carbono entre plantas. Aunque sí podía descubrir que una planta receptora había adquirido carbono marcado de una planta donante pero era imposible saber si la planta donante había tomado la misma cantidad de carbono de la receptora. El planteamiento de Simard le permitió calcular el movimiento en una dirección menos el movimiento en la dirección contraria, o sea el movimiento neto entre plantas.

5. Read (1997).

6. Para injertos de raíces, véase Bader y Leuzinger (2019); para «deberíamos centrarnos...», véase Read (1997). Si se comparan a otros estudios, los injertos de raíces se han estudiado poco en las últimas décadas, aunque expliquen bastantes fenómenos interesantes, como los «tocones vivos», capaces de sobrevivir mucho tiempo después de haber sido talados. Los injertos de las raíces se pueden producir entre raíces de un solo individuo, entre individuos congéneres e incluso entre individuos de especies diferentes.

7. Barabási (2001).

8. Para un ensayo sobre la World Wide Web, véase Barabási y Albert (1999); para información general sobre las novedades en la ciencia de redes a mediados de la década de 1990, véase Barabási (2014); para «más cosas en común...», véase Barabási (2001); para «red cósmica» y estructura reticular del universo, accédase al resumen de Ferreira (2019), también Gott (2016), cap. 9, Govoni et al. (2019) y Umehata et al. (2019) con comentarios de Hamden (2019).

9. Para un resumen de los ensayos que han descubierto una transferencia de recursos biológicamente importante entre plantas, véase Simard et al. (2015). Para «280 kg», véase Klein et al. (2016) y comentario de Van der Heijden (2016). El estudio de Klein et al. (2016) fue excepcional al medir la transferencia de carbono entre árboles adultos en el bosque. Los árboles tenían una edad similar, o sea que entre ellos no había la obvia cuesta abajo de la fuente al sumidero.

10. Para estudios que revelan pocos o variables beneficios, véase Van der Heijden et al. (2009) y Booth (2004). En su conjunto, los experimentos que han examinado especies relacionadas con un grupo conocido como hongos ectomicorrícicos, han descubierto beneficios claros para las plantas. Y los que han estudiado a los hongos micorrícicos arbusculares, uno de los grupos más antiguos, han revelado efectos más ambiguos.

11. Para más información sobre la disparidad de opiniones dentro de la comunidad científica y las diferentes interpretaciones de la prueba, véase Hoeksema (2015). Parte del problema reside en que es complicado llevar a cabo experimentos sobre redes micorrícicas compartidas en el marco controlado de un laboratorio, pero aún lo es más en suelos naturales. De entrada, es muy difícil mostrar que dos plantas están conectadas por el mismo hongo. Los sistemas vivos son permeables. Hay infinidad de maneras en las que un marcador radioactivo aplicado en una planta puede acabar en otra. Además, cualquier experimento que se efectúe sobre redes debe comparar plantas conectadas a la red con plantas que no lo están. El problema es que las redes son el modo preestablecido. Algunos investigadores cortan los lazos fúngicos que hay entre las plantas al desplazar las finas barreras de malla que median entre ellas. Otros cavan zanjas para separar a las plantas, pero es difícil saber si estas intervenciones causan daños colaterales.

12. Para múltiples orígenes de la micoheterotrofía, véase Merckx (2013). Charles Darwin fue un gran aficionado a las orquídeas, y pasó mucho tiempo dándole vueltas a cómo las orquídeas podían sobrevivir con semillas tan pequeñas. En 1863, en una carta a Joseph Hooker, director de los Kew Gardens, Darwin escribió que aunque «no tenía una prueba convincente con lo que demostrarlo», tenía la «firme convicción» de que las semillas germinadas de las orquídeas «parasitarían en su etapa más temprana en criptógamas (u hongos)». No fue hasta tres décadas después que los hongos demostraron ser cruciales para la germinación de las semillas de las orquídeas (Beerling, 2019, p. 141).

13. Para la «planta de la nieve», véase Muir (1912), cap. 8; para los «mil cables invisibles», véase Wulf (2015), cap. 23. Este fue un tema recurrente para Muir, quien también escribió sobre los «innumerables cables irrompibles», y claro, también nos dejó su frase más famosa: «Cuando intentamos seleccionar algo por sí mismo, descubrimos que está enganchado al resto de cosas del universo».

14. Para más información sobre *Allotropa* y *matsutake*, véase Tsing (2015), *Interlude. Dancing*.

15. La dinámica fuente-sumidero regula la fotosíntesis de las plantas. Cuando se acumulan los productos de la fotosíntesis, se reduce el ritmo de esta. Las redes micorrícicas de los hongos aumentan la tasa de la fotosíntesis de las plantas al actuar como un sumidero de carbono, evitando así la acumulación de productos que normalmente desacelerarían el proceso (Gavito et al., 2019).

16. Para información del ensayo de Simard cuando colocó sus plántulas de abeto a la sombra, véase Simard et al. (1997); para plantas moribundas, véase Eason et al. (1991).

17. Para cambio de dirección del flujo de carbono, véase Simard et al. (2015).

18. Para más información sobre el rompecabezas evolutivo, véase Wilkinson (1998) y Gorzelak et al. (2015).

19. Para compartir los recursos sobrantes como un «bien público», véase Walder y Van der Heijden (2015). Otra posibilidad es que la planta receptora albergue multitud de especies de hongos diferentes. La planta A podría beneficiarse de la comunidad de hongos de la planta B cuando las condiciones cambian. Hay diversas comunidades de hongos que ofrecen un seguro contra la incertidumbre medioambiental (Moeller y Neubert, 2016).

20. Para selección de parentesco mediada por conexiones micorrícicas compartidas, véase Gorzelak et al. (2015), Pickles et al. (2017) y Simard (2018). Algunas especies de helecho han empleado una forma de selección de parentesco, o ‘cuidado’ parental, al usar redes micorrícicas compartidas, y quizá lo han hecho durante millones de años (Beerling 2019, pp. 138-140). Estas especies de helecho (de los géneros *Lycopodium*, *Huperzia*, *Psilotum*, *Botrychium* y *Ophioglossum*) tienen dos fases en su ciclo vital. Las esporas germinan en un individuo llamado «gametófito». Los gametófitos son pequeños individuos que no realizan la fotosíntesis. Están allí donde tiene lugar la fertilización. Cuando un gametófito ha sido fertilizado, se convierte en «esporófito», su fase ‘adulta’ sobre el suelo. El esporófito es donde tiene lugar la fotosíntesis. Los gametófitos solo pueden sobrevivir bajo tierra porque se les ha suministrado carbono por las redes micorrícicas, compartidas por los esporófitos adultos. Es el caso del «toma ahora, paga después».

21. Para transporte bidireccional, véase Lindahl et al. (2001) y Schmieder et al. (2019).

22. Para ensayos que muestran los beneficios de las plantas cuando participan en redes micorrícicas compartidas, véase Booth (2004), McGuire (2007), Bingham y Simard (2011) y Simard et al. (2015).

23. Para ensayos que muestran las desventajas de las plantas cuando no participan en redes micorrícicas compartidas, véase Booth (2004); para intensificación de la competencia por redes micorrícicas compartidas, véase Weremijewicz et al. (2016) y Jakobsen y Hammer (2015).

24. Para «carril fúngico rápido» y transporte de venenos por parte de los hongos, véase Barto et al. (2011, 2012) y Achatz y Rillig (2014).

25. Para hormonas, véase Pozo et al. (2015); para transporte de núcleos por las redes micorrícicas de los hongos, véase Giovannetti et al. (2004, 2006); para transporte de ácido ribonucleico entre una planta parasitaria y su huésped, véase Kim et al. (2014); para interacción mediada por ácido ribonucleico entre plantas y patógenos fúngicos, véase Cai et al. (2018).

26. Para utilización de las redes fúngicas por parte de las bacterias, véase Otto et al. (2017), Berthold et al. (2016) y Zhang et al. (2018); para influencia de la bacteria «endohifal» (intrahifal) en el metabolismo de los hongos, véase Vannini et al. (2016), Bonfante y Desirò (2017) y Deveau et al. (2018); para cultivo de bacterias en colmenillas, véase Pion et al. (2013) y Lohberger et al. (2019).

27. Babikova et al. (2013).

28. Babikova et al. (2013).



29. Para transferencia de información entre tomateras, véase Song y Zeng (2010); para envío de señales de estrés entre plántulas de abeto de Douglas y pino, véase Song et al. (2015a); para transferencia entre plántulas de abeto de Douglas y pino, véase Song et al. (2015b).

30. Para envío de señales eléctricas en plantas, véase Mousavi et al. (2013), Toyota et al. (2018) y comentarios de Muday y Brown-Harding (2018); para respuesta eléctrica de las plantas a herbívoros, véase Salvador-Recatalà et al. (2014). Quedan muchas cuestiones sin responder sobre las conversaciones químicas que mantienen las raíces de las plantas con los hongos que, de entrada, les permiten relacionarse. En su día, David Read intentó cultivar la micoheterotrófica planta de la nieve –la «incandescente columna de fuego» de John Muir– e hizo algunos progresos antes de toparse con «un muro de ladrillo». «Fue fascinante», recordó Read:

> […] el hongo creció hacia la semilla mostrando un enorme entusiasmo e interés –se esponjó y ‘saludó’–. Ahí había una señal clara. Lo triste es que nunca tuvimos plantas lo bastante grandes para dar el siguiente paso. La próxima generación de investigadores tendrá que trabajar en estas preguntas sobre las señales.

31. David Read opina casi lo mismo. Él mismo me lo explicó: «Hace un par de semanas alguien de un programa de radio quiso entrevistarme sobre las plantas que hablan entre ellas y todo ese tipo de chorradas».

32. Beiler et al. (2009, 2015). Otros ensayos se han fijado en la arquitectura de las redes micorrícicas compartidas basándose en qué especies interactúan pero no han profundizado en la disposición espacial de los árboles en un ecosistema. Estos incluyen Southworth et al. (2005), Toju et al. (2014, 2016) y Toju y Sato (2018).

33. Si uno trazara aleatoriamente líneas entre los árboles en la parcela de bosque de Beiler, cada árbol terminaría con un número similar de enlaces entre ellos. Sería raro encontrar árboles con un número excepcionalmente alto o excepcionalmente bajo de enlaces. Uno podría calcular un número medio de enlaces por árbol, y casi todos tendrían un número similar. En el lenguaje de las redes, este nodo estándar representaría la 'escala' de la red. En realidad nosotros vemos algo diferente. En las parcelas de Beiler, en el mapa de la Red de Barabási, o en una red de rutas de aviación, unos pocos núcleos altamente conectados representan la inmensa mayoría de conexiones en la red. Los nodos en este tipo de red difieren tanto entre sí que no hay ningún nodo que definiríamos como estándar. Las redes no tienen 'escala', y son descritas como «libres de escala». El descubrimiento de Barabási de redes libres de escala a finales de la década de 1990 permitió disponer de un marco para crear modelos de comportamientos de sistemas complejos. Para diferencias entre núcleos bien conectados y mal conectados, véase Barabási (2014), cap. *The Sixth Link: The 80/20 Rule*; para vulnerabilidad de las redes libres de escala, véase Albert et al. (2000) y Barabási (2001); para más información sobre redes libres de escala en el mundo natural, véase Bascompte (2009).

34. Para más información sobre diferentes tipos de redes micorrícicas y sus arquitecturas contrastadas, véase Simard et al. (2012); para más información sobre la fusión entre diferentes redes micorrícicas arbusculares, véase Giovannetti et al. (2015). Solo porque dos árboles estén enlazados, no significa que estén enlazados de la misma manera. Algunos alisos, por ejemplo, se asocian con muy pocas especies de hongos que, a su vez, no suelen asociarse con otras plantas que no sean alisos. Esto significa que los alisos tienen una tendencia aislacionista y forman redes cerradas e introvertidas. En términos de la arquitectura conjunta de un tramo de bosque, un bosquecillo de alisos sería un 'módulo' –bien conectado internamente pero poco entrelazado (Kennedy et al. 2015)–. Estamos acostumbrados a esta idea. Traza una red con tus conocidos en un trozo de papel. Después considera que cada enlace es una relación. ¿Cuántas de tus relaciones son equivalentes? ¿Qué pierdes cuando cuentas tu relación con tu hermana, tu primo tercero, tu amigo del trabajo y tu casero como enlaces equivalentes en tu red social? Los científicos de redes Nicholas Christakis y James Fowler describen el grado de influencia de un enlace dado en una red social en términos de su contagio. Tú puedes tener un enlace social entre tu hermana y tu casero, pero el grado de influencia, el 'contagio', que lleva cada uno de estos enlaces diferirá. Christakis y Fowler tienen una teoría conocida como «tres grados de influencia» para describir cómo disminuye la influencia después de tres grados de separación (Christakis y Fowler, 2009, cap. 1).

35. Prigogine y Stengers (1984), cap. 1.

36. Para ecosistemas como sistemas adaptables complejos, véase Levin (2005); para el comportamiento dinámico no lineal de ecosistemas, véase Hastings et al. (2018).

37. Para los paralelismos de Simard entre redes micorrícicas compartidas y redes neuronales, véase Simard (2018). Los científicos de otros campos comparten este punto de vista. Manicka y Levin (2019) dicen que las herramientas que hasta ahora se utilizaban exclusivamente para estudiar el funcionamiento del cerebro deberían emplearse en otros campos de la biología para superar el problema de «silos temáticos» que aíslan campos de investigación biológica. En neurociencia, un «conectomo» es un mapa que traza las conexiones de las neuronas en un cerebro. ¿Sería posible trazar el conectomo de micorrizas de un sistema? «Si tuviera una financiación ilimitada –me decía Beiler–, tomaría todas las muestras que quisiese de un bosque entero. Solo entonces podrías tener una visión muy precisa de la red (quién se asocia exactamente con quién y dónde) y una visión amplia del sistema en su conjunto.» Para un ejemplo de un ensayo en neurociencia con un planteamiento parecido, véase Markram et al. (2015).

38. Simard (2018).

39. «Muchos hongos interactúan con las raíces de una manera imprecisa –me explicó Marc-André Selosse–. Mira las trufas, por ejemplo. Por supuesto, tú puedes encontrar micelio de trufa creciendo en las raíces de sus árboles ‘huésped’ habituales. Pero también lo puedes encontrar en las raíces de plantas cercanas que no son ni sus huéspedes habituales ni son con las que suelen establecer asociaciones micorrícicas. Estas relaciones informales no son estrictamente micorrícicas pero, sin embargo, existen.» Para más información sobre hongos micorrícicos que se vinculan a plantas diferentes, véase Toju y Sato (2018).

1. Muchas de estas primeras plantas –catalogadas como licófitos y pteridofitas– producían, en comparación, poca madera ‘de verdad’, y se cree que habían estado formadas principalmente por un material similar a la corteza, conocido como «peridermis» (Nelsen et al., 2016).

2. Para 3 billones de árboles, véase Crowther et al. (2015). Según la mejor estimación actual sobre las distribuciones de biomasa global, las plantas representan el 80% (aprox.) de la biomasa total en la Tierra. Se calcula que, aproximadamente, el 70% de esta fracción vegetal es tallo 'leñoso' y tronco, o sea que el 60% de la biomasa global es madera (Bar-On et al., 2018).

3. Para composición de madera y abundancias relativas de lignina y celulosa, véase Moore (2013a), cap. 1.

4. Para introducción a la descomposición de la madera y a la combustión enzimática, véase Moore et al. (2011), cap. 10.7, y Watkinson et al. (2015), cap. 5.

5. Para 85 gigatoneladas, véase Hawksworth (2009); para un cálculo del carbono global en el 2018, véase Quéré et al. (2018). El otro grupo importante de hongos degradadores son los hongos «de la podredumbre parda», llamados así porque hacen que la madera cobre un color pardo. Dichos hongos digieren la celulosa que compone la madera y pueden utilizar química radical para acelerar la descomposición de la lignina. Su estrategia es un poco diferente a la de los hongos de la podredumbre blanca. En lugar de utilizar radicales libres para desmantelar las moléculas de lignina, producen radicales que reaccionan con la lignina y hacen que sea vulnerable a la descomposición bacteriana (Tornberg y Olsson, 2002).

6. Se ha debatido mucho sobre cómo pudo quedar tanta madera sin pudrir durante tanto tiempo. En un artículo publicado en *Science* en el 2012, un equipo encabezado por David Hibbett argumentó que la evolución de la lignina peroxidasa en los hongos de podredumbre blanca coincidió aproximadamente con el «acusado descenso» de enterramiento de carbono al final del Carbonífero, insinuando que los depósitos del Carbonífero pueden haber aparecido porque los hongos no habían desarrollado aún su capacidad para degradar la lignina (Floudas et al., 2012, con comentarios de Hittinger, 2012). Este descubrimiento apoyaba la hipótesis expuesta primero por Jennifer Robinson (1990). En el 2016, Matthew Nelsen et al. publicaron un artículo refutando esta hipótesis, en varios terrenos:

> Muchas de las plantas que formaban los depósitos del Carbonífero responsables de grandes cantidades del carbono sepultado no eran grandes productoras de lignina.
> Los hongos y bacterias que degradan la lignina pueden haber estado presentes antes del período Carbonífero.
> Vetas significativas de carbón se han formado después del momento en el que se cree que los hongos de la podredumbre blanca han desarrollado enzimas que degradan la lignina.
> Si no hubiera habido degradación de lignina antes del período Carbonífero, todo el dióxido de carbono en la atmósfera habría sido eliminado en menos de un millón de años (Nelsen et al., 2016, con comentarios de Montañez, 2016).

El caso no queda claro. Los índices relativos de descomposición *versus* el enterramiento de carbono son difíciles de medir, y cuesta imaginar que la capacidad de los hongos de la podredumbre blanca para degradar la lignina y otros componentes duros de la madera, como la celulosa microcristalina, no habría tenido impacto en los niveles globales del enterramiento de carbono (Hibbett et al., 2016).

7. Para degradación del carbón por parte de los hongos, véase Singh (2006), pp. 14-15; el «hongo del queroseno» es una levadura, *Candida keroseneae* (Buddie et al., 2011).

8. Hawksworth (2009). Véase también Rambold et al. (2013), quien afirma que «la micología debería ser reconocida como cualquier otra disciplina importante en el campo de la biología».

9. Para micología en la antigua China, véase Yun-Chang (1985); para el estado de la micología en la China actual y la producción mundial de setas, véase *State of the World's Fungi* (2018); para muertes por envenenamiento de setas, véase Marley (2010).

10. *State of the World’s Fungi* (2018); Hawksworth (2009).

11. Para más información sobre la historia reciente de la ciencia ciudadana y la «zooniverse» –un portal digital que permite a la gente participar en proyectos de investigación sobre una amplia variedad de campos–, véase Lintott (2019), revisado por West (2019); para un debate clásico sobre «expertos profanos» en relación con la crisis del sida, véase Epstein (1995); para más información sobre la actual colaboración abierta al público en la ciencia, véase Kelty (2010); para ciencia ciudadana en ecología, véase Silvertown (2009); para más información sobre la historia de la ciencia experimental 'floreciente' orquestada en casa, véase Werrett (2019). La obra de Charles Darwin es un ejemplo notable. Durante casi toda su vida, llevó a cabo casi todo su trabajo en casa. Crió orquídeas en los alféizares de las ventanas, manzanas en el jardín, palomas de carreras y lombrices en la terraza. Casi todas las pruebas que Darwin expuso para apoyar su teoría de la evolución procedían de redes de criadores *amateur* de animales y plantas, y mantuvo una voluminosa correspondencia con redes de coleccionistas aficionados y entusiastas de jardinería muy bien organizados (Boulter, 2010). Hoy, las plataformas digitales abren nuevas posibilidades. A finales del 2018, un temblor sísmico de baja frecuencia viajó por todo el mundo, escapando a los sistemas convencionales de detección de terremotos. Su trayectoria e identidad fueron ensamblados en una colaboración espontánea entre académicos y sismólogos 'ciudadanos' que interactuaron en Twitter (Sample 2018).

12. Para una historia de la micología autosuficiente, véase Steinhardt (2018).

13. McCoy (2016), p. XX.

14. Para cifras sobre residuos agrícolas, véase Moore et al. (2011), cap. 11.6; para pañales en Ciudad de México, véase Espinosa-Valdemar et al. (2011) –incluso cuando se dejó el plástico, la pérdida de masa siguió siendo impresionante, un 70%–. Para residuos agrícolas en la India, véase Prasad (2018).

15. Para la proliferación de hongos durante la extinción del Cretácico-Terciario, véase Vajda y McLoughlin (2004); para *matsutake* después de la bomba de Hiroshima, véase Tsing (2015), Prólogo. Tsing escribe en sus notas que la fuente de su historia es difícil de sostener.

16. Para un vídeo del *Pleurotus* en colillas de cigarrillo, véase: https://web.archive.org/web/20200429100059/ https://www.youtube.com/watch?v=fCAX9P50SNU [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

17. Para más información sobre enzimas no específicas de los hongos y el potencial para descomponer toxinas, véase Harms et al. (2011).

18. En el 2015, Stamets recibió un premio de la Mycological Society of America. En la presentación oficial, se le describió como un socio tremendamente original y autodidacta de la comunidad micológica que ha tenido un enorme y continuado impacto en el campo de la micología» (fungi.com/blogs/articles/paul-receives-the-gordon-and-tina-wassonaward [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]). En una entrevista con Tim Ferris en el 2018, Stamets explicó que le habían dado el premio por «atraer a más estudiantes que nadie hacia el campo de la micología en toda su historia» (tim.blog/2018/10/15/the-timferriss-show-transcripts-paul-stamets/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]).

19. Para DMMP, véase Stamets (2011), *Part II: Mycorestoration*. Conviene saber que el *Psilocybe azurescens* no se menciona aquí (Stamets me lo dijo personalmente).

20. Para un resumen de la capacidad de los hongos para descomponer toxinas, véase Harms et al. (2011); para información más amplia sobre micorremediación, véase McCoy (2016), cap. 10.

21. Para carreteras miceliares, véase Harms et al. (2011); para micofiltración de *E. coli*, véase Taylor et al. (2015); para la empresa finlandesa que recupera oro con micelio, véase: https://web.archive.org/web/20200429095819/ https://phys.org/news/201404-filter-recover-gold-mobile-scrap.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]. Bastantes ensayos revelaron la presencia de setas enriquecidas con cesio radioactivo, un metal pesado, tras el accidente nuclear de Chernobyl (Oolbekkink y Kuyper, 1989, Kammerer et al., 1994, Nikolova et al., 1997).

22. Para más información sobre las necesidades adicionales de los hongos, véase Harms et al. (2011); para retos, véase McCoy (2016), cap. 10.

23. Para CoRenewal, véase corenewal.org [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; para limpieza con hongos después de los incendios de California, véase: newfoodeconomy.org/mycoremediation-radical-mycology-mushroom-natural-disaster-pollution-clean-up/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; para barreras flotantes de *Pleurotus* en el puerto danés, véase: www.sailing.org/news/87633.php#.XCkcIc9KiOE [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

24. Para el hongo que digiere poliuretano, véase Khan et al. (2017); para otro ejemplo de un hongo que digiere plástico, véase Brunner et al. (2018). El micólogo Tradd Cotter, de la organización Mushroom Mountain, gestiona una iniciativa de colaboración abierta para reunir cepas de hongos de lugares atípicos: newfoodeconomy.org/mycoremediation-radical-mycology-mushroom-natural-disaster-pollution-clean-up/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

25. Para Mary Hunt, véase Bennett y Chung (2001). El «grupo de gente» no necesariamente tiene que ser siempre «no científica». En el 2017, un estudio publicado por el Earth Microbiome Project en *Nature* llamó la atención por su metodología atípica. Los investigadores extendieron su petición a científicos de todo el mundo para que enviaran muestras medioambientales bien conservadas para incluirlas en el estudio de la diversidad microbiana del mundo (Raes, 2017).

26. Cada año, Charles Darwin competía con su primo, un vicario, para ver quién podía cultivar las peras más grandes cruzando las últimas variedades. Era una competición que se convirtió en un gran entretenimiento para toda la familia. Véase Boulter (2010), p. 31.

27. Para Wu San Kwung, véase McCoy (2016), p. 71; para «setas de París», véase Monaco (2017); para una historia general del cultivo en Europa, véase Ainsworth (1976), cap. 4. Hay una versión contemporánea del cultivo subterráneo de setas en París. El número de automóviles de propiedad en la capital francesa desciende y varios aparcamientos subterráneos se han convertido en exitosos cultivos de setas comestibles; véase www.bbc.co.uk/news/av/business-49928362/turning-paris-s-underground-car-parksinto-mushrooms-farms [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

28. Los seres humanos no son la única especie que prepara setas. Hay varias especies de ardillas en Norteamérica que las secan y almacenan para su consumo posterior (O'Regan et al., 2016).

29. Para antigüedad de los termiteros de *Macrotermes*, véase Erens et al. (2015); para complejidad de las sociedades de *Macrotermes*, véase Aanen et al. (2002).

30. Para más información sobre la digestión de las *Macrotermes*y metabolismos productivos, véase Aanen et al. (2002), Poulsen et al. (2014) y Yong (2014).

31. Para termitas que comen «propiedades privadas», véase Margonelli (2018), cap. 1; para termitas que comen billetes, véase www.bbc.co.uk/news/world-southasia-13194864 [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; para más información sobre los productos fúngicos de Stamets que matan insectos, véase Stamets (2011), cap. 8: *Mycopesticides*. Un ensayo publicado en *Science* en el 2019 revelaba que una cepa genéticamente modificada de *Metarhizium* eliminó prácticamente todos los mosquitos en un experimento llevado a cabo en Burkina Faso en un «entorno casi natural». Los autores proponen el empleo de la cepa modificada de *Metarhizium* para luchar contra la propagación de la malaria (Lovett et al., 2019).

32. Para ‘despertar’ el suelo, véase Fairhead y Scoones (2005); para beneficios de la tierra de termiteros, véase Fairhead (2016); para destrucción del destacamento francés, véase Fairhead y Leach (2003).

33. Para jerarquías espirituales, véase Fairhead (2016). En zonas de Guinea, la gente reboza las paredes de las casas con tierra recogida en el interior de termiteros de *Macrotermes* (Fairhead 2016).

34. Para más información sobre materiales hechos con hongos, véase Haneef et al. (2017) y Jones et al. (2019); para pilas de champiñón, véase Campbell et al. (2015); para sucedáneos fúngicos de la piel, véase Suarato et al. (2018).

35. Para micomateriales resistentes a las termitas, véase: phys.org/news/2018-06-scientists-material-fungus-rice-glass.html [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]. Los materiales de micelio para la construcción se han utilizado en bastantes exposiciones notorias, a destacar el pabellón-galería del PS1 del 2014 en el Museum of Modern Art de Nueva York, y la Shell Mycelium Installation, en Kochi (India).

36. Para estructuras en crecimiento de la NASA en el espacio, véase: www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2018_Phase_I_Phase_II/Myco-architecture_off_planet/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020]; para hormigón de hongos «que se autocura», véase Luo et al. (2018).

37. Para hacer conglomerado de micelio de madera, se mezclan serrín y maíz hasta formar una pasta líquida. A la mezcla se le inocula micelio de hongos y se introduce en moldes de plástico. El micelio ‘recorre’ el sustrato formando una horma de masa de micelio entrelazado y madera parcialmente digerida. Para hacer cuero y espuma blanda se emplea un método muy diferente. En lugar de meter el sustrato inoculado en moldes, se esparce sobre sábanas. Al controlar las condiciones de crecimiento, el micelio queda convencido para crecer hacia arriba. En menos de una semana, se puede recoger una capa esponjosa. Cuando se comprime y se tuesta, produce un material que se parece muchísimo al cuero. Si se seca tal como está, forma una espuma.

38. El objetivo a más largo plazo de Eben Bayer es comprender la biofísica de cómo el micelio crea estructuras físicas. «Pienso en los hongos como en ensambladores nanotecnológicos que ponen a las moléculas en su lugar –me explicó–. Intentamos comprender cómo la orientación de las microfibras en 3D influye en las propiedades de los materiales; su solidez, durabilidad y flexibilidad.» La intención de Bayer es desarrollar hongos genéticamente programables. Si logramos controlarlo, me explicó, «seremos capaces de insertarlo en un material diferente. Incluso podrías hacer que excrete un compuesto plastificante como la glicerina. Entonces tendrías algo que por naturaleza es más flexible y resistente al agua. ¡Podrías hacer tantas cosas!». «Podrías» es la palabra clave. La genética de los hongos es complicada y apenas se entiende. Insertar un gen y dejar que el hongo lo manifieste es una cosa, pero insertar un gen y dejar que el hongo lo manifieste de una manera estable y predecible es otra, y programar el comportamiento del hongo dándole una tanda de órdenes genéticas es incluso otra.

39. Al no haber precedentes para construir con hongos, hay que investigar mucho. Y a Bayer le interesa más la investigación que la producción pura y dura. De hecho, en los últimos 10 años, han invertido 30 millones de US$ en investigación. Para trabajar con micelio de esta manera se necesitan nuevos métodos, nuevas formas para persuadir al hongo para que crezca, para que se comporte de forma diferente.

40. Para FUNGAR, véase: info.uwe.ac.uk/news/uwenews/news.aspx?id=3970 [última fecha de acceso: de junio del 2020] y www.theregister.co.uk/2019/09/17/like_computers_love_fungus/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

41. Stamets et al. (2018).

42. Para importancia de los polinizadores y del declive polinizador, véase Klein et al. (2007) y Potts et al. (2010); para problemas causados por los ácaros varroa, véase Stamets et al. (2018).

43. Para un análisis de los compuestos antivirales a base de hongos, véase Linnakoski et al. (2018); para más información sobre el Project BioShield, véase Stamets (2011), cap. 4. Stamets me contó que se había descubierto que los hongos con una actividad antiviral más fuerte eran los agáricos *(Lacrifomes officionalis)*, los *chaga (Inonotus obliquus)*, los *reishi* (especies de *Ganoderma*), los políporos de abedul *(Fomitopsis betulina)* y los cola de pavo *(Trametes versicolor)*. Las historias mejor documentadas de tratamientos con hongos vienen de China, donde las setas medicinales han ocupado un lugar central en la farmacopea durante 2000 años como mínimo. El clásico de las plantas medicinales que data del año 200 d.C. (aprox.), el *Shennong Ben Cao*, se cree que es una recopilación de tradiciones transmitidas oralmente mucho más antiguas, e incluye varios hongos que se utilizan aún hoy en la medicina, a destacar los *reishi (Ganoderma lucidum)* y los políporos umbelados *(Polyporus umbellatus)*. El *reishi* era uno de los más venerados, de ahí que aparezca en innumerables pinturas, esculturas y bordados (Powell 2014).

44. Stamets et al. (2018).

1. Para levaduras en el microbioma humano, véase Huffnagle y Noverr (2013).

2. Para secuenciación del genoma de la levadura, véase Goffeau et al. (1996); para premios Nobel sobre levadura, véase *State of the World's Fungi* (2018), cap. *Useful Fungi*.

3. Para más información sobre pruebas sobre las primeras prácticas para elaborar alcohol, véase Money (2018), cap. 2.

4. Lévi-Strauss (1973), p. 473.

5. Para domesticación de la levadura, véase Money (2018), cap. 1 y Legras et al. (2007); para pan antes de cerveza, véase Wadley y Hayden (2015) y Dunn (2012). El desarrollo de la agricultura afectó a un buen número de relaciones de los seres humanos con los hongos. Se considera que muchos patógenos fúngicos de las plantas han evolucionado en paralelo a los cultivos domesticados. Tal y como pasa hoy, la domesticación y el cultivo proporcionan nuevas oportunidades a los patógenos fúngicos de las plantas (Dugan, 2008, p. 56).

6. Me inspiré en el excelente libro *Sacred Herbal and Healing Beers* (Buhner, 1998).

7. Para sumerios y el egipcio *Libro de los Muertos*, véase Katz (2003), cap. 2; para chortís, véase Aasved (1988), p. 757; para Dioniso, véase Kerényi (1976) y Paglia (2001), cap. 3.

8. Para más información sobre levadura en biotecnología, véase Money (2018), cap. 5; para Sc.2.0, véase syntheticyeast.org/sc2-0/introduction/ [última fecha de acceso: 29 de junio del 2020].

9. Para rapsodias, véase Yun-Chang (1985); Yamaguchi Sodo citado en Tsing (2015), *Prologue*; Albertus Magnus citado en Letcher (2006), p. 50; John Gerard citado en Letcher (2006), p. 49.

10. Wasson y Wasson (1957), vol. II, cap. 18. Los Wasson dividieron buena parte del mundo en sus categorías. Estados Unidos (Wasson era estadounidense) era micofóbico, como los anglosajones y los escandinavos. Rusia (Valentina era rusa) era micofílica, comolos eslavos y los catalanes. «Los griegos –observaron los Wasson con desdén– han sido siempre micófobos […]. De la primera página a la última de los escritos de los antiguos griegos no encontramos ni una sola palabra bonita hacia las setas.» Pero claro, las cosas difícilmente son tan sencillas. Los Wasson confeccionaron un sistema binario y fueron los primeros en disolver sus encorsetamientos. Observaron que los finlandeses eran «por tradición micófobos» pero en zonas donde los rusos veraneaban habían aprendido a «conocer y apreciar muchas especies». Los Wasson omitieron decir qué lugar ocupaban exactamente los finlandeses reformados entre los dos polos de su sistema.

11. Para reclasificación de hongos y bacterias, véase Sapp (2009), p. 47.

12. Para más información de la historia de la taxonomía de los hongos, véase Ainsworth (1976), cap. 10.

13. Para Teofrasto, véase Ainsworth (1976), p. 35; para asociación de hongos con impactos de rayos e información general sobre el conocimiento de los hongos en Europa, véase Ainsworth (1976), cap. 2; para «El orden de los hongos» y una buena historia general de la taxonomía de los hongos, véase Ramsbottom (1953), cap. 3.

14. Money (2013).

15. Raverat (1952), p. 136.

16. Uno de los primeros intentos taxonómicos documentados para ordenar los hongos se hizo en 1601, y dividía las especies de setas en categorías de «comestible» y «venenosa», es decir, a partir de la relación que podrían tener con un cuerpo humano (Ainsworth, 1976, p. 183). Estos criterios son pocas veces significativos. Se puede utilizar levadura de la cerveza para hacer pan y alcohol pero puede crear una infección potencialmente mortal si entra en la sangre.

17. La palabra «mutualismo» fue explícitamente política durante las primeras décadas de su existencia, pues describía una escuela de pensamiento anarquista temprano. A finales del siglo XIX los biólogos alemanes también entendieron el concepto de «organismo» en términos explícitamente políticos. Rudolf Virchow entendió que el organismo estaba constituido por una comunidad de células cooperantes, cada una trabajando para el bien del conjunto, como una población de ciudadanos cooperantes interdependientes que apuntala el funcionamiento de un Estado-Nación saludable (Ball, 2019, cap. 1).

18. Para «cerca de los márgenes», véase Sapp (2004). Los intelectuales han dedicado una atención considerable a la relación entre la teoría de la evolución por selección natural de Darwin, el análisis del abastecimiento de alimentos y poblaciones humanas de Thomas Malthus y la teoría del mercado de Adam Smith. Véase, por ejemplo, Young (1985).

19. Sapp (1994), cap. 2.

20. Sapp (2004).

21. Para Needham, véase Haraway (2004), p. 106, y Lewontin (2000), p. 3.

22. Toby Kiers, profesora de la Universidad Libre de Ámsterdam, es una de las principales defensoras de aplicar «marcos del mercado biológico» a las interacciones entre plantas y hongos. Los mercados biológicos no son en sí mismos una idea nueva –se han empleado durante décadas para analizar el comportamiento animal–, pero Kiers y sus colegas son los primeros en aplicarlos a organismos sin cerebro (véase p. ej.: Werner et al., 2014, Wyatt et al., 2014, Kiers et al., 2016, y Noë y Kiers, 2018). Para Kiers, las metáforas económicas apuntalan modelos económicos, que son herramientas de investigación útiles. «No se trata de intentar establecer analogías con los mercados humanos», me dijo. En su lugar, «nos permite hacer predicciones más demostrables». En lugar de meter el mundo vertiginosamente variable del intercambio entre plantas y hongos en nociones difusas como «complejidad» o «dependencia del contexto», los modelos económicos permiten descomponer las densas redes de interacciones y probar hipótesis básicas. Kiers empezó a interesarse por los mercados biológicos cuando descubrió que las plantas y los hongos micorrícicos utilizan 'recompensas recíprocas' para regular su intercambio de carbono y de fósforo. Las plantas que reciben más fósforo de un hongo lo abastecen con más carbono; los hongos que reciben más carbono abastecen a la planta con más fósforo (Kiers et al., 2011). Para Kiers, los modelos de mercado proporcionan una herramienta para entender cómo estos 'comportamientos estratégicos comerciales' podrían haber evolucionado, y cómo podrían cambiar en condiciones diferentes. «Hasta ahora ha sido una herramienta muy útil, incluso en la forma que nos permite probar diferentes experimentos –me explicó–. Podríamos decir: "La teoría sugiere que cuando aumentamos el número de socios la estrategia comercial va a cambiar de alguna manera en función de esos recursos". Eso nos permite probar un experimento: intentemos cambiar el número de socios y veamos si esta estrategia cambia en realidad. Es un orientador en lugar de un protocolo estricto.» En este caso, los marcos de mercado son una herramienta, un conjunto de historias basadas en interacciones que ayudan a formular preguntas sobre el mundo, a generar nuevas perspectivas. No digo, como hizo Kropotkin, que los seres humanos deban basar su comportamiento en organismos no humanos. Ni digo tampoco que las plantas y los hongos sean, en realidad, individuos capitalistas que toman decisiones racionales. Por supuesto, aunque lo fueran sería improbable que su comportamiento encajara a la perfección en un modelo económico humano determinado. Como cualquier economista admitiría, los mercados humanos no se comportan como mercados 'ideales' en la práctica. La enrevesada complejidad de la vida económica humana se sale de los modelos construidos para albergarla. Y de hecho, las vidas de los hongos tampoco encajan a la perfección en la teoría del mercado biológico. Para empezar, los mercados biológicos dependen –como los mercados capitalistas humanos de los que provienen– de ser capaces de identificar individuos *traders*que actúan para su propio interés. La verdad del asunto es que no está claro qué cuenta como individuo *trader* (Noë y Kiers, 2018). El micelio de un hongo micorrícico 'individual' podría fundirse con otro y terminar con varios tipos de núcleos –varios genomas diferentes– viajando por su red. ¿Qué es lo que cuenta como individuo? ¿Un núcleo individual? ¿Una sola red interconectada? ¿Un ovillo de su red? Kiers se muestra sincera con estos retos: «Si la teoría del mercado biológico no es útil para estudiar interacciones entre plantas y hongos, entonces la dejaremos de usar». Los marcos de mercado son herramientas cuya utilidad no se sabe de antemano. Sin embargo, los mercados biológicos suponen un problema para algunos investigadores del campo. Tal y como señaló Kiers, «este debate puede despertar sensibilidades sin motivo aparente para que las haya». Quizá se debe al hecho que los marcos del mercado biológico tocan la fibra sociopolítica. Los sistemas económicos humanos son muchos y diversos. Aun así, el cuerpo de la teoría conocido como marcos del mercado biológico guarda un parecido sorprendente con el capitalismo de libre mercado. ¿Ayudaría comparar el valor de modelos económicos sacados de diferentes sistemas culturales? Hay muchas maneras de dar valor y podría haber otras monedas que se han tenido en cuenta.

23. Internet y la World Wide Web son sistemas que se organizan a sí mismos, más que muchas tecnologías humanas (en palabras de Barabási, la World Wide Web parece tener «más en común con una célula o un sistema ecológico que con un reloj suizo»). No obstante, estas redes se construyen a partir de máquinas y protocolos que no se organizan a sí mismos, y dejarían de funcionar sin una atención constante del ser humano.

24. Jan Sapp me explicó una historia que ilustra lo fácil que es que las metáforas de los biólogos se conviertan en un punto de ignición. Constató que muchas retrataban a los organismos más grandes y más complejos (p. ej. animales y plantas) como más «exitosos» que las bacterias y hongos a los que se asociaban. Sapp trató con displicencia este argumento. «Pero, ¿qué definición de éxito? La última vez que miré, el mundo era principalmente microbiano. Este planeta pertenece a los microbios. Los microbios estaban al principio, y estarán al final, mucho después que los animales 'superiores' hayan desaparecido. Crearon la atmósfera y la vida tal y como la conocemos, forman casi toda nuestra masa corpórea.» Sapp explicó cómo cambió una metáfora el biólogo evolutivo John Maynard Smith al restar importancia a los microbios. Si un microbio salía ganando de una relación, Maynard Smith lo llamaba «parásito microbiano», y al organismo grande, el «huésped». Sin embargo, si el organismo grande manipulaba al microbio, Maynard Smith no llamaba parásito al organismo grande. Cambió las metáforas, y llamó amo al gran organismo, y esclavo al microbio. La preocupación de Sapp reside en el hecho de que el microbio sea o un parásito o un esclavo, pero para Maynard Smith nunca podría ser entendido como un socio dominante que manipule al «huésped». El microbio nunca podía ser quien esté al control.

25. Para «*puhpowee*», véase Kimmerer (2013), caps: *Learning the Grammar of Animacy* y *Allegiance to Gratitude*. El primatólogo holandés Frans de Waal, frustrado con la gente que usa la carga del «antropomorfismo» para defender la excepcionalidad del ser humano, se queja de «negación antropocéntrica»: «el rechazo *a priori* de características compartidas entre humanos y animales cuando, de hecho, podrían existir» (de Waal 1999).

26. Hustak y Myers (2012).

27. Ingold (2003) se pregunta si sería muy diferente el pensamiento humano si los hongos, y no los animales, se hubieran tomado como el «ejemplo paradigmático de una forma de vida». Investiga las conclusiones de adoptar un «modelo fúngico» de vida, defendiendo que los humanos no están menos insertados en redes: es solo que nuestras «vías de relación» son más difíciles de ver que las de los hongos.

28. Para «Compartir recursos...», véase Waller et al. (2018).

29. Deleuze y Guattari (2005), p. 11.

30. Carrigan et al. (2015). La alcohol dehidrogenasa es diferente de la acetaldehído dehidrogenasa, otra enzima responsable para metabolizar el alcohol que varía entre poblaciones humanas y puede causar que la gente tenga problemas para metabolizar el alcohol.



31. Para la hipótesis del mono ebrio, véase Dudley (2014). Cuando se manifiesta la actividad de los hongos, está demostrado que el aroma de la fruta se potencia y provoca que los animales y aves se las lleven (Peris et al., 2017).

32. Wiens et al. (2008), Money (2018), cap. 2.

33. Para consecuencias de la producción de biocombustible en Estados Unidos véase Money (2018), cap. 5; para cambio de la utilización de la tierra y biocombustibles, véase Wright y Wimberly (2013); para subvenciones y liberación de carbono, véase Lu et al. (2018).

34. Stukeley (1752).

**(*) N del t. Juego de palabras en inglés entre *bat habits* y *bad habits*.**

**(*) N. del t. Espacios de creación y colaboración.**

*La red oculta de la vida. Cómo los hongos condicionan nuestro mundo, nuestra forma de pensar y nuestro futuro*
Merlin Sheldrake



Título original: *Entangled Life. How Fungi Make Our Worlds, Change Our Minds and Shape Our Futures*
Publicado por primera vez en inglés en el Reino Unido por The Bodley Head, 2020.


Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
www.editorial.planeta.es
www.planetadelibros.com

Primera edición en libro electrónico (epub): noviembre del 2020

ISBN: 978-84-08-23577-4 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L. www.newcomlab.com